

UNIVERSIDAD DEL VALLE



**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR PARA EL ANÁLISIS
DE FALLAS EN CENTRALES HIDROELECTRICAS DE EPSA**

JUAN DAVID ORTEGÓN HENAO

MAESTRÍA EN INGENIERIA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELECTRICA

FACULTAD DE INGENIERIA

SANTIAGO DE CALI, JULIO 2017

UNIVERSIDAD DEL VALLE



**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR PARA EL ANÁLISIS
DE FALLAS EN CENTRALES HIDROELECTRICAS DE EPSA**

JUAN DAVID ORTEGÓN HENAO

DIRECTORES

ING. GLADYS CAICEDO DELGADO, PhD

ING. FRANCISCO MURCIA POLO Ms.C.

MAESTRÍA EN INGENIERIA CON ÉNFASIS EN INGENIERÍA ELECTRICA

FACULTAD DE INGENIERIA

SANTIAGO DE CALI, JULIO 2017

Nota de Aceptación

Firma de la Directora

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Santiago de Cali, Junio de 2017

DEDICATORIA

A mis hijos María, Alejandra y Juan.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por las maravillosas oportunidades de crecer y aprender, y por las personas que ha puesto en mi camino que con su apoyo me han inspirado a alcanzar nuevas metas.

RESUMEN

Las fallas que se producen en una central de generación tienen consecuencias importantes a nivel productivo y económico, es indispensable que se adopten medidas para evitar que las fallas se produzcan de manera sistemática. La metodología ACR ha conseguido proveer soluciones eficaces en muchos ámbitos. En el presente trabajo se ha consolidado una Metodología de Análisis de Causa Raíz específica para el análisis de fallas en centrales hidroeléctricas de EPSA, la propuesta incluye formatos diseñados de manera específica para cada una de las etapas del análisis y un paso a paso para la realización del mismo. La metodología ha sido aplicada en una falla real que ha sido propuesta por la Gerencia de Generación de EPSA. Se presentan los resultados del análisis y su respectiva aplicación en el software *PROACT SUITE V 4* adquirido por la compañía para facilitar el desarrollo de los análisis.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 1 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	13
1.1 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (ACR)	13
1.2 METODOLOGÍAS PARA EL ACR	14
1.2.1 Metodología Apollo.....	14
1.2.2 Metodología TapRoot.....	15
1.2.3 Metodología Reason	16
1.2.4 Metodología DMAIC	17
1.2.5 Metodología PROACT.....	18
1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS.....	22
CAPITULO 2 METODOLOGÍA ACR APLICADA A LAS CENTRALES HIDRÚLICAS DE EPSA.....	24
2.1 EVENTOS A LOS QUE SE APLICARÁ EL ACR EN LAS CH DE EPSA..	24
2.2 METODOLOGÍA PROPUESTA	24
2.2.1 Identificación del evento o tipo de falla a analizar.	25
2.2.2 Conformación de equipos de análisis de eventos:	25
2.2.3 Recolectar información:.....	27
2.2.4 Realizar el análisis del funcionamiento de todo el sistema fallado	29
2.2.5 Generar el árbol lógico	29
2.2.6 Determinación de medidas correctivas y preventivas	34
CAPITULO 3 DESCRIPCION DEL SISTEMA EN ESTUDIO	35
3.1 INTRODUCCIÓN.....	35
3.1.1 Distribuidor	35
3.2 CASO DE ESTUDIO.....	38
3.3 INFORMACIÓN RECOPIADA	39
3.3.1 Bujes	45
3.3.2 Empaques	51
3.3.3 Espárragos.....	54
3.3.4 Datos de falla por Fuga de agua en el buje intermedio en los tres grupos generadores.....	55

CAPITULO 4	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ APLICADO A UNA FALLA CRÍTICA EN LA CENTRAL ALTO DE ANCHICAYA.....	58
4.1	ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	58
4.1.1	Diligenciamiento de formatos.	58
4.1.2	Estudio de información recolectada.	67
4.1.3	Construcción del Árbol Lógico.....	75
4.1.4	Identificar causas raíces: Físicas, Humanas y Latentes.....	82
4.1.5	Determinación de medidas correctivas y preventivas	85
CAPITULO 5	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR	86
5.1	SOFTWARE DE ANÁLISIS	86
5.2	DESARROLLO DEL ANÁLISIS EN EL SOFTWARE.....	86
5.2.1	Ajustes administrativos del Software.....	86
5.2.2	Creación del caso de análisis.....	91
5.2.3	Construcción del Árbol Lógico.....	102
5.2.4	Identificar causas raíces: Físicas, Humanas y Latentes.....	113
5.2.5	Determinación de medidas correctivas y preventivas	119
CONCLUSIONES	128
REFERENCIAS	130
ANEXO 1	FORMATOS DE LA METODOLOGÍA	132
Anexo 1a	para la Identificación del evento o tipo de falla a analizar	132
Anexo 1b	para la definición del equipo de análisis para cada caso de evento.....	134
Anexo 1c	para la recolección de información.	135
Anexo 1d	para la construcción del diagrama de ambiente del sistema fallado.....	137
Anexo 1e	para la construcción de la tabla de señales del sistema fallado.....	138
Anexo 1f	para la construcción del diagrama funcional.	139
ANEXO 2	IMPRESIÓN DEL REPORTE AUTOMÁTICO.	140

LISTA DE FIGURAS

Pag.

Figura 1-1 Secuencia de Etapas TapRoot.	16
Figura 1-2 Esquema de Árbol lógico.	21
Figura 2-1 Modelo del Diagrama Lógico – Análisis Causa Raíz.	31
Figura 3-1 Corte transversal Turbina Francis.....	35
Figura 3-2. Partes del distribuidor de una turbina Francis de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicaya.	36
Figura 3-3. Animación de un corte transversal de una turbina Francis.	37
Figura 3-4. Rotor del generador del Alto Anchicaya.	39
Figura 3-5. Plano de la tapa superior de una turbina Francis en AutoCAD.	41
Figura 3-6. Parte intermedia del eje de los alabes llamado Muñón o vástago.	42
Figura 3-7. Fuga de agua por el muñón del buje intermedio.	43
Figura 3-8 Corte transversal eje del álabe móvil, Turbina Francis Alto Anchicayá.	44
Figura 3-9. Motobombas que extraen el exceso de agua.	45
Figura 3-10. Material utilizado en los bujes.	47
Figura 3-11. Procedimiento #4, presión ejercida de la prensa sobre el buje y esquema de instalación a presión.....	48
Figura 3-12. Congelación de hielo seco con fines de enfriamiento del buje para disminuir su diámetro.	49
Figura 3-13. Tubo de asistencia media para minimizar la cantidad de hielo seco.	49
Figura 3-14. Empaques utilizados para sellar el buje intermedio de los alabes.	51
Figura 3-15. Montaje de Empaques en los muñones de los alabes.	53
Figura 3-16. Ubicación del personal para el montaje.	53
Figura 3-17. Ubicación de los espárragos en la tapa superior del muñón.	54
Figura 3-18. Espárragos partidos luego de una falla.	54
Figura 3-19 Histórico de Fallas por unidad.	57
Figura 4-1 Fuga de agua Generador 1 Alabe #8, Septiembre de 2015.	67
Figura 4-2 Fuga de agua Generador 1 Alabe #8, Octubre de 2015.....	68
Figura 4-3 Esparrago de la tapa del álabe #8 Generador 1	68
Figura 4-4. Promedio del desgaste abrasivo para cojinetes típicos con distintos materiales.	71
Figura 4-5 Árbol Lógico General Inicial.....	76
Figura 4-6 Empaques dañados grupo de generación 3.	77
Figura 4-7. Análisis químico de esparrago.....	79
Figura 4-8 Esparrago oxidado grupo generación 3.....	80
Figura 4-9 Montaje de bujes 6 y 9 grupo generador 3.	82
Figura 4-10 Montaje de bujes 6 y 9 grupo generador 3.	83
Figura 4-11 Árbol Lógico General Final	84

Figura 5-1 Pantalla inicial. PROACT.....	87
Figura 5-2 Definición características administrativas. PROACT	88
Figura 5-3 Definición de participantes en el equipo de trabajo. PROACT.	89
Figura 5-4 Resumen de participantes en el equipo de trabajo. PROACT	90
Figura 5-5 Pantalla Opciones de usuario. PROACT	91
Figura 5-6 Paso 1 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	92
Figura 5-7 Paso 4 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	93
Figura 5-8 Paso 5 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	94
Figura 5-9 Paso 6 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	95
Figura 5-10 Paso 7 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	96
Figura 5-11 Paso 8 para la creación de un nuevo ACR. PROACT	97
Figura 5-12 Listado de secciones para la realización del análisis causa raíz.	98
Figura 5-13 Pantalla “Go to Preserve Section”	99
Figura 5-14 Adicionar Links a cada dato recolectado.	100
Figura 5-15 Vista en cuadrícula.	101
Figura 5-16 Pantalla “Go to order section”	102
Figura 5-17 Pantalla para ingresar el nombre del evento.	103
Figura 5-18 Pantalla para ingresar los modos de falla.	104
Figura 5-19 Parte superior del árbol lógico	105
Figura 5-20 Añadir nuevas hipótesis.....	106
Figura 5-21 Cuadro información de cada hipótesis.....	107
Figura 5-22 Árbol lógico completo con hipótesis.....	108
Figura 5-23 Pantalla para verificación de hipótesis.....	110
Figura 5-24 Pantalla de hipótesis verificada.	111
Figura 5-25 Árbol lógico con hipótesis verificadas.	112
Figura 5-26 Añadir recuadro para crear la Causa Raíz Física	113
Figura 5-27 Ventana para ingresar información de las causas raíces.	114
Figura 5-28 Identificación Causa Raíz Física.	115
Figura 5-29 Identificación Causa Raíz Humana	116
Figura 5-30 Identificación Causa Raíz Latente	117
Figura 5-31 Árbol lógico Finalizado. Software ACR	118
Figura 5-32 Pantalla de Causa Raíz. Botón “Make Recommendation”	119
Figura 5-33 Recomendación realizada a la causa raíz latente del proyecto.....	121
Figura 5-34 Pantalla para seguimiento de recomendaciones	122
Figura 5-35 Pantalla para imprimir reportes.....	123
Figura 5-36 Selección de Temas para la impresión del reporte automático.	124
Figura 5-37 Selección de los elementos de la Portada del reporte automático. ..	125
Figura 5-38 Ventana de verificación de la selección para impresión del reporte automático.	126
Figura 5-39 Sección de resumen Software ACR	127

LISTA DE TABLAS

Pag.

Tabla 1-1 Comparación de las metodologías de investigación utilizadas en el análisis de causa raíz	23
Tabla 3-1. Históricos de cambio de Bujes. Año de instalación.	45
Tabla 3-2. Historico de Fallas unidad de generación 1.....	55
Tabla 3-3. Historico de Fallas unidad de generación 2.....	56
Tabla 3-4. Historico de Fallas unidad de generación 3.....	56
Tabla 4-1 Modos de Falla	75

INTRODUCCIÓN

En la literatura sobre mantenimiento industrial es común observar que el servicio técnico encuentra que muchas de las fallas que se producen, ya se han presentado con anterioridad, a tal punto, que refieren tener la sensación de estar haciendo las mismas reparaciones una y otra vez. Por otra parte, las fallas que se producen en una central de generación tienen consecuencias importantes a nivel productivo y económico: pueden suponer un alto costo de reparación, además de considerables pérdidas por los beneficios no percibidos a causa de la energía que ha dejado de generarse. De esta manera, es indispensable que se adopten medidas para evitar que las fallas se produzcan de manera repetitiva.

Desde hace algunos años, EPSA ha implementado un método de análisis de fallas en sus centrales hidráulicas, sin embargo, evidencia la necesidad de implementar el método de Análisis de Causa Raíz, que le permitiría desarrollar estrategias para minimizar la ocurrencia de las fallas repetitivas que se presentan actualmente en sus centrales. Es importante señalar que la implementación del ACR permitiría a la compañía tener en cuenta los conocimientos adquiridos en tantos años de experiencia operativa al realizar el análisis de las fallas.

Con el presente trabajo se pretende consolidar una metodología específica para el análisis de fallas en las centrales hidroeléctricas de EPSA, lo cual incluye el diseño de los formatos específicos para cada una de las etapas del análisis; parte fundamental del trabajo será la aplicación de la metodología propuesta en una falla real que ha sido propuesta por la Gerencia de Generación de EPSA. La consolidación de este método permitirá identificar oportunidades de mejora en las prácticas de mantenimiento de las Centrales de EPSA, y podría llevar a mejorar los diseños de los equipos o sistemas y los ajustes de los equipos, todos estos, beneficios que redundan en disminución de la ocurrencia del mismo tipo de fallas. Adicionalmente, se pretende implementar la falla analizada en el software *PROACT SUITE V 4* que ha sido adquirido por la empresa como herramienta para facilitar a los analistas el desarrollo del proceso.

De esta manera, el primer capítulo de este trabajo presenta la metodología ACR y realiza un análisis comparativo de los diferentes métodos con que se analizan las causas raíces pretendiendo determinar cuál de ellas se ajusta más a las necesidades propias de los análisis requeridos por la compañía en mención. A continuación, el capítulo dos presenta de manera detallada cada uno de los pasos a seguir para el procedimiento de análisis que se propone a la compañía, se incluyen en el paso a paso los formatos que se precisan en cada una de las etapas. El capítulo 3,4 y 5 presentan respectivamente una descripción del sistema en estudio en el caso propuesto por EPSA para ser analizados en el presente trabajo, el análisis del evento y su respectiva aplicación en el software.

CAPITULO 1 ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ

En el presente capítulo se desarrollan algunas ideas fundamentales sobre el análisis de causa raíz, se presentan las metodologías utilizadas para llevar a cabo este tipo de estudios y, a partir de un comparativo de las metodologías descritas, se argumenta la selección de la metodología a implementar en el presente trabajo.

1.1 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (ACR)

Dado que algunas fallas suelen ser repetitivas o tener un serio impacto a nivel productivo y económico, ha sido cada vez más importante que además de dar una solución inmediata a la falla ocurrida, se adopten medidas preventivas para que ésta no vuelva a presentarse. De esta manera se ha ido consolidando el método ACR, cuyo objetivo es determinar las causas raíces de una falla y, una vez identificadas, proponer medidas que prevengan de una futura aparición de la misma. La gran acogida de esta estrategia en muchos campos de aplicación se debe a su capacidad para aportar soluciones que disminuyan la incidencia de una falla o mejor aún, para que esta no vuelva a presentarse. De esta manera, cuando una pieza se rompe, la solución inmediata es sustituirla por una nueva, y de hecho hay que sustituirla, pero es probable que al hacer esto no se esté actuando sobre la causa que produjo la avería, sino tan solo sobre el síntoma; si lo que se busca es evitar el fallo o al menos que su incidencia sea menor, es necesario estudiar la causa y actuar sobre ella. El ACR satisface ambas necesidades.

En síntesis, el análisis de causa raíz es un proceso ordenado que permite identificar las causas que provocaron una situación no deseada, una falla, problema, etc. Además, El ACR emplea un conjunto de técnicas y herramientas capaces de identificar los puntos claves donde ocurren los problemas, logrando así eliminar las causas esenciales en lugar de solo corregir los síntomas[9]. Actualmente las organizaciones están aplicando el ACR para mejorar la confiabilidad en los sistemas ya que permite tomar acciones correctivas que reducen el periodo de investigación, cumpliendo con la *Estandar Asset Management ISO 55000* [1].

La aplicación del ACR en las organizaciones permite los siguientes beneficios:

- Reducción de la exposición al riesgo (personal, seguridad operacional).
- Mejora en la eficiencia de los procesos, debido a la prevención y eliminación sistemática de fallas.

- Reducción de costos de reparación al ser identificados y corregidos los modos de falla crónicos.
- Desarrollo de un plan de acciones correctivas justificado por costo y riesgo.
- Implementación de un proceso de revisión y supervisión de requerimientos con el fin de prevenir la recurrencia de eventos no deseados.

1.2 METODOLOGÍAS PARA EL ACR

El análisis de causa raíz puede realizarse mediante diferentes metodologías que han ido estructurándose, cada una con sus propias etapas para establecer el fondo del problema a analizar, permitiendo desarrollar planteamientos eficaces y obtener soluciones efectivas.

Algunas de las metodologías utilizadas en el Análisis de Causa Raíz son:

- APOLLO
- TAPROOT
- REASON
- DMAIC
- PROACT

A continuación se describen los principios en los que se fundamenta cada una de las metodologías mencionadas:

1.2.1 Metodología Apollo

Es una metodología desarrollada por Dean L. Gano en 1987, después de años de experiencia de investigación en la industria nuclear. Apollo es un proceso lógico y práctico que permite identificar las relaciones de causa y efecto de una falla o evento, evitando que el problema se repita [5]. El método ACR Apollo requiere que todas las causas sean compatibles con pruebas. Si no hay evidencia para apoyar una causa, se marca con un signo de interrogación (?) que indica que no se dispone de la información necesaria para seguir con el análisis y que se debe realizar una búsqueda exhaustiva de más información.

Esta metodología se basa en la comprensión de cuatro principios de causalidad: [5].

1. Causa y Efecto. Las causas y efectos son la misma cosa, solo se ven desde un punto de vista diferente en el tiempo [3].
2. Cada efecto tiene al menos dos causas en forma de acciones y condiciones.

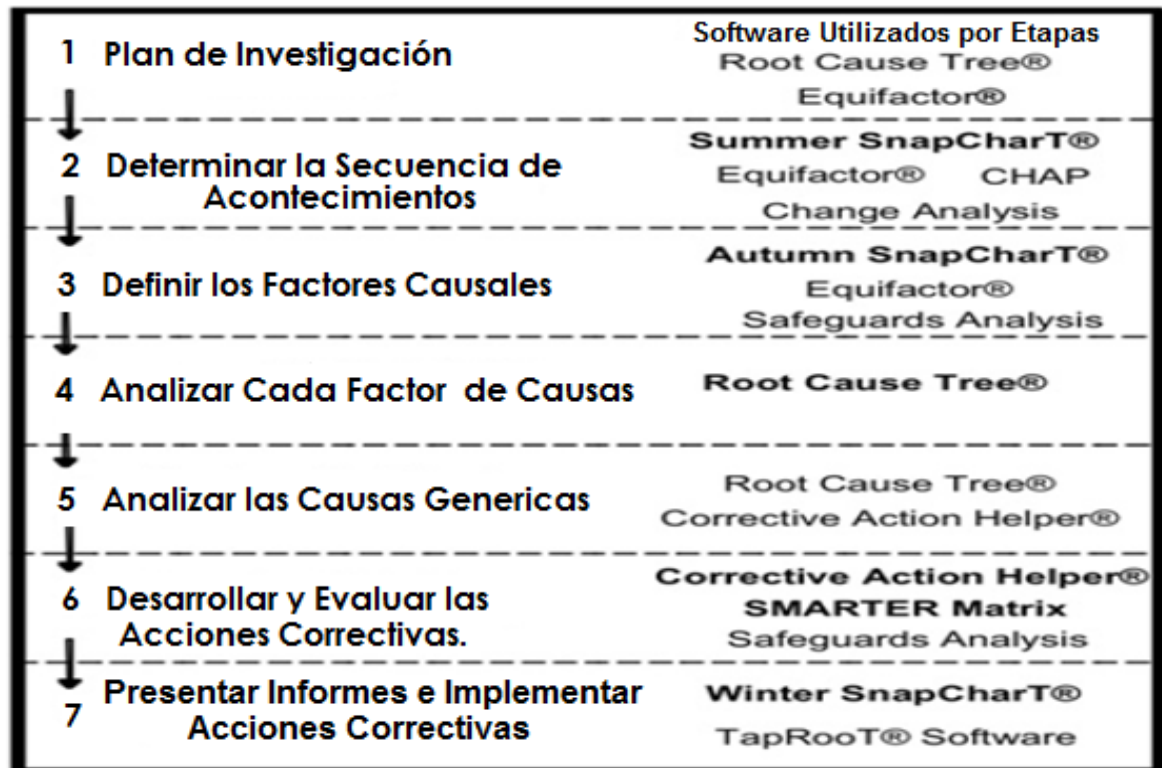
3. Causas y efectos son parte de una serie continua infinita de causas. Los efectos no son lineales y se ramifican en al menos dos causas cada vez que se pregunta el porqué de ellos.
4. Un efecto solo existe si sus causas existen en el mismo espacio y marco de tiempo.

1.2.2 Metodología *TapRoot*

Esta metodología fue desarrollada por Mark Paradies en 1991 después de haber estado en la marina de guerra nuclear, en la cual observo los errores de los operadores y mecánicos incluso cuando están bien entrenados y realizan buenos procedimientos. El Análisis de Causa Raíz *TapRoot* utiliza procesos y técnicas para investigar, analizar y desarrollar acciones correctivas en la búsqueda de las causas fundamentales de una falla, accidentes, incidentes cotidianos, problemas de producción, errores de fabricación, errores humanos, problemas de mantenimiento es decir en todo tipo de problemas críticos. Una de las ventajas de esta metodología es que se puede utilizar de forma reactiva para prevenir la recurrencia de un evento, o de forma proactiva para encontrar maneras de mejorar el rendimiento ante un accidente grave [6].

La metodología *TapRoot* es utilizada en una variedad de industrias tales como: Aeroespacial, telecomunicaciones, química, petroquímica, construcción, exploración y producción de petróleo, entre otras. [10] El proceso de análisis de causa raíz *TapRoot* se lleva a cabo mediante siete etapas, en cada etapa se utiliza una herramienta de investigación establecida por el software. La secuencia de las etapas se observa en la **Figura 1.1**

Figura 1-1 Secuencia de Etapas TapRoot.



Fuente: R. J. Duphily, “Root Cause Investigation Best Practices Guide,” 2014 [11].

1.2.3 Metodología Reason

El Análisis de Causa Raíz Reason es una metodología desarrollada por James Reason, que guía al investigador a hacer las preguntas correctas en el momento adecuado descubriendo los hechos relevantes, relaciones causales y posibles soluciones. La metodología Reason es aplicada a las industrias químicas, petrolera, manufacturera, aeroespacial entre otras [7].

Esta metodología cuenta con un software propio que ofrece una perspectiva adicional en la investigación del accidente, incidente o evento. Este software ayuda al investigador a encontrar el “por qué”, el “como” y “cuando” proporcionando preguntas enfocadas lógicamente por cada hecho que se encuentre.

A continuación se describen las etapas a seguir de la metodología Reason:[3]

1. Identificar relaciones causales. El objetivo de esta etapa es proporcionar una explicación de cada factor causal que permita entender el evento ocurrido.

2. Construir un modelo del evento. En esta etapa se construye una representación gráfica de manera clara y fácil de entender, la cual permita observar la secuencia que provoco el evento.
3. Verificar las relaciones causales. El objetivo es validar cada hecho utilizando principios de razonamiento causal de la metodología Apollo.
4. Descubrir causas y oportunidades correctivas. Luego de validar cada hecho con causas el investigador tiene la posibilidad de encontrar soluciones que se puedan corregir directamente dentro de la organización.
5. Comparar opciones de solución. Debido a que cada causa representa una solución, en esta etapa es necesario verificar la solución con mayor beneficio que abarque no solo una causa si no varias logrando óptimos resultados.
6. Informe de los resultados. Se debe realizar un informe sobre la investigación realizada y almacenarlo en una base de datos impresa y en medio magnético. *Reason software* cuenta con una herramienta capaz de generar automáticamente un informe de la investigación realizada y ser almacenado en la base de datos del software.
7. Informe de lecciones aprendidas. Una de las características de esta metodología es que almacena todas las experiencias organizativas (hechos pertinentes y soluciones) que se adquirieron durante la investigación.
8. Difusión del conocimiento. El objetivo de la última etapa es proporcionar el conocimiento a todo el personal para que el accidente, incidente o evento no se repita.

1.2.4 Metodología DMAIC

El Análisis de Causa Raíz DMAIC es una metodología desarrollada por la industria Automotriz en los años 1990 y fue utilizada por General Electric en 1995. Esta metodología consiste básicamente en cinco etapas que son: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. A continuación se definen las cinco etapas utilizadas en la metodología DMAIC [8] [12]:

1. **Definir.** En la fase inicial se identifican los posibles proyectos de mejora y se definen los siguientes criterios:
 - Equipo de investigación.
 - Problema.
 - Alcance.
 - Meta.
 - Plan.

2. **Medir.** El objetivo de esta fase es entender por qué los defectos generan fracasos. Es necesario identificar y medir todo tipo de información que permita encontrar las variables que afectan en el proceso.
 - Medir el desempeño actual del proceso.
 - Definir el proceso de recolección de datos.
 - Obtener datos.
3. **Analizar.** En esta etapa se estudian todos los datos obtenidos de las mediciones y se determinan las causas críticas mediante las siguientes preguntas: ¿Que variables del proceso afectan más la calidad?, ¿Cuáles se pueden controlar? Esta etapa utiliza los siguientes criterios:
 - Analizar los datos e identifica las causas raíces del problema.
 - Encuentra la razón por la que suceden las fallas.
 - Identifica las oportunidades de mejora.
 - Proporciona un Diagrama de flujo.
4. **Mejorar.** El objetivo de esta etapa es el desarrollo, implementación y validación de las alternativas propuestas para el proceso de mejora.
 - Generar diferentes soluciones para cada una de las causas raíz.
 - Evaluar y seleccionar la mejor solución.
 - Evaluar los modos de falla de la solución.
 - Validar las mejoras mediante estudios a pequeña escala
 - Corregir y reevaluar la solución.
5. **Controlar.** Esta última fase se define el plan de control que tiene como objetivo asegurar que la solución sea sostenible y no permita que ocurra otra vez el problema.
 - Documentar el plan de control
 - Monitorear el proceso.
 - Garantizar que la solución es mantenida.
 - Difundir el proyecto.

1.2.5 Metodología PROACT

El análisis de causa raíz PROACT es una metodología desarrollada por *Reliability Center Inc.* que permite identificar las causas raíces físicas, humanas y latentes de cualquier tipo de falla o evento. Facilitando herramientas para documentar y comunicar el análisis del problema, logrando obtener recomendaciones y conclusiones que permiten llevar a cabo las acciones correctivas.[3]

Causa Raíz Física: El origen de la causa es debido a una falla física en los diferentes elementos del sistema, por ejemplo: ruptura, corrosión, desgaste, etc.

Causa Raíz Humana: El origen de la causa es debido a factores humanos que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla, por ejemplo mala maniobra, mal mantenimiento, etc.

Causa Raíces Latentes: El origen de la causa es debido a fallas de tipo organizacional, sistemas de información, etc.

Una característica fundamental de ésta metodología es que utiliza preguntas que permiten más posibilidades de respuesta, por ejemplo: *¿cómo podría haber sucedido tal evento?* en vez de preguntar *¿por qué sucedió tal evento?*.

El nombre PROACT se refiere en sus siglas en ingles a las etapas a seguir para el desarrollo de la metodología:

- **PR**eserve: Preservar la información del evento.
- **O**rders: Ordenar el equipo de análisis.
- **A**nalyze: Analizar el evento.
- **C**omunicate: Comunicar los hallazgos y emitir las recomendaciones y conclusiones.
- **T**racking: Seguimiento de los resultados finales.

A continuación se describen cada uno de los pasos a seguir esta metodología:

1. Preservar la información del evento

Conseguir la evidencia en una investigación y preservarla para que pueda ser utilizada en análisis posteriores. PROACT utiliza una herramienta de levantamiento de información llamada 5p's, haciendo referencia a los siguientes cinco tipos de información que se debe recopilar: [9]

- **Personas**

Se refiere al personal que está relacionado con el evento y que debe ser entrevistado, incluyendo: la gerencia, la administración, ingenieros, operadores, etc.

- **Paradigmas**

Son creencias que tienen las personas y que muchas veces contribuyen negativamente en la toma de decisiones. Por ejemplo: "La culpa es del fabricante", "la maquina está mal diseñada", "estos siempre ha ocurrido en la planta", "siempre ha funcionado así". En este punto es muy importante que las posibles afirmaciones sean comprobadas.

- **Partes**

Este punto consiste en recopilar evidencia física o tangible de la parte fallada. Por ejemplo: Cables, tuberías, rodamientos, muestras, tornillo suelto, etc.

- **Posición**

El objetivo principal es recoger la mayor información relacionada con el tiempo y el espacio donde ocurrió el evento. Por ejemplo: ubicación del evento, cuando ocurrió, hora del evento, fecha, turno, ubicación geográfica, etc.

- **Papel**

Se refiere a todos los documentos que son pertinentes al análisis. Por ejemplo: Reportes, registros, datos del fabricante, históricos, resultados de pruebas, historiales de mantenimiento, especificaciones, documento en la web, etc.

2. Ordenar el equipo de análisis

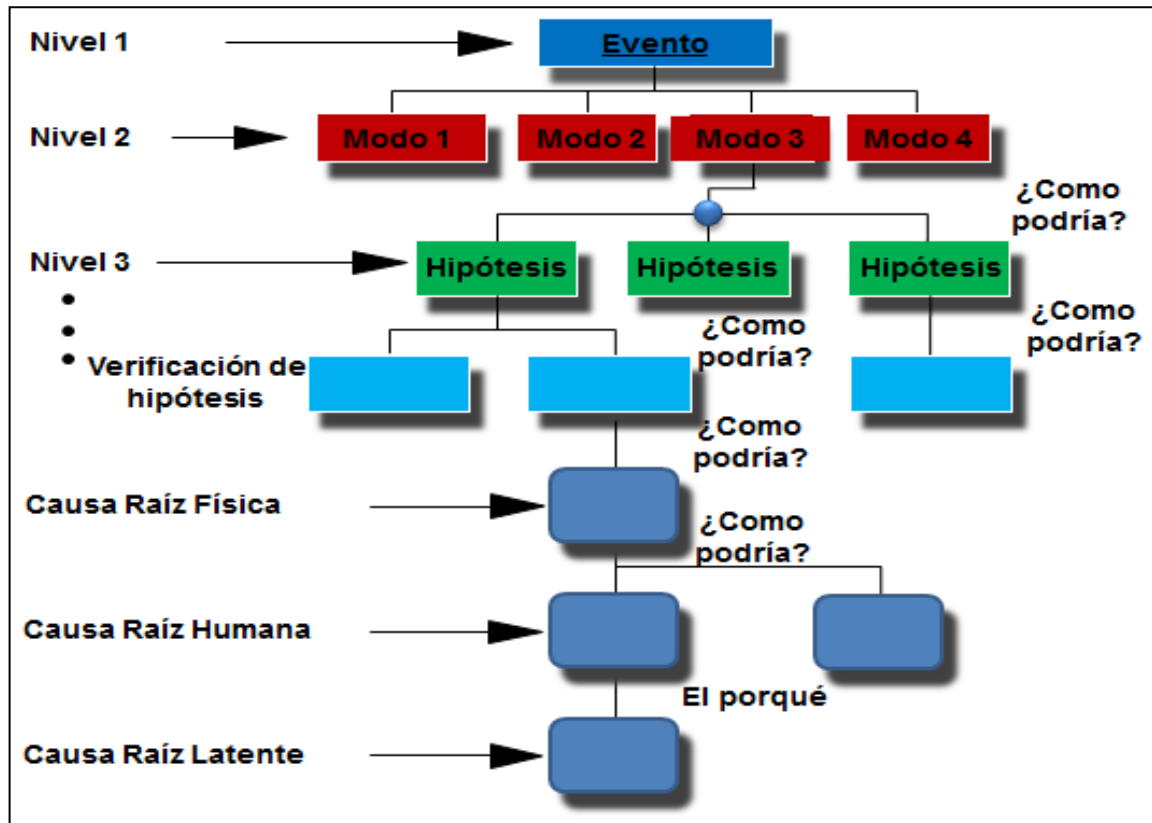
Es necesario asignar a la investigación un Facilitador imparcial que tenga dominio en el desarrollo de la metodología PROACT. Al conformar un equipo de análisis de causa raíz es necesario tener en cuenta estas reglas:

- Escoger un grupo multidisciplinario que pueda aportar ideas desde todos los puntos de vista.
- Desarrollar un reglamento explícito para la buena comunicación entre el equipo.
- Desarrollar un programa de actividades.
- Asignar a cada miembro del equipo responsabilidades para la captura de la información. En este punto es necesario que el equipo se repartan la estrategia de las 5p's.
- Llevar a cabo el análisis asegurando la imparcialidad de los miembros del equipo, con el fin de lograr el objetivo establecido.

3. Analizar el evento

De acuerdo a la información recopilada en la primera sección, esta se emplea como evidencia de lo que realmente ocurrió o no. En este punto inicialmente se utiliza un diagrama o representación del evento ocurrido. Posteriormente se emplea un árbol lógico para representar gráficamente las relaciones causa-efecto visualizar la ilustración de la Figura1-2.

Figura 1-2 Esquema de Árbol lógico.



Fuente: Elaboración Propia.

El árbol lógico de esta metodología es una representación gráfica del evento. En cada nivel del árbol lógico se encuentran respectivamente: la descripción de los hechos asociados con el Evento, los Modos de Falla, manifestaciones del evento o síntomas y las hipótesis que deben ser validadas. Después de haber validado las hipótesis se empieza a determinar los diferentes tipos de causas raíces descubriendo inicialmente las causas raíces físicas, seguido de las causas raíces humanas y las causas raíces latentes.[4]

4. Comunicar los hallazgos y emitir las recomendaciones y conclusiones

En este punto se presentan los descubrimientos obtenidos en la investigación para que el equipo este notificado y luego se desarrollan las recomendaciones pertinentes para corregir las causas raíces identificadas.

5. Seguimiento de los resultados finales

Luego de haber comunicado los hallazgos de manera exitosa y si las recomendaciones han sido implementadas, es necesario hacer un seguimiento para

validar las recomendaciones y obtener los resultados esperados. En el caso que se identifique nuevas causas en el seguimiento, es necesario reevaluar el evento.

Esta metodología PROACT Cuenta con un software basado en la experiencia de más de 800 investigaciones de campo, que proporciona plantillas de conocimiento dando como resultado el descubrimiento de más posibles causas que los investigadores puedan haber pasado por alto.

1.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS

Uno de los problemas al hacer comparaciones entre diferentes metodologías es la falta de estandarización del ACR, lo cual produce que los autores no diferencien entre metodologías, métodos y herramientas generando confusión al momento de investigar sobre estas. Sin embargo cada metodología pretende explicar de manera lógica como se debe analizar un evento no deseado y poder encontrar sus causas raíces para posteriormente aplicar las acciones correctivas en estas.

Algunas comparaciones de las metodologías estudiadas anteriormente se basan en los principios de investigación y lógica que se deben cumplir para obtener un proceso de análisis de causas raíz. Un proceso de ACR debe proporcionar una comprensión fácil y clara, con el fin de obtener un estudio efectivo. Se deben establecer que causas raíces se van a encontrar y además presentar evidencias de cada hipótesis. Luego proporcionar soluciones que logren prevenir la recurrencia de un evento no deseado.

En la Tabla 1-1 se realiza un cuadro comparativo de las metodologías estudiadas de acuerdo a criterios necesarios para la elaboración de un análisis de causa raíz exitoso. Algunos de los criterios que se tienen en cuenta en la comparación están relacionados con: (1) la formación, en la cual se establece si es necesario que los investigadores se entrenen en el conocimiento de la metodología para poder desarrollarla; (2) la identificación de las causas raíces con cada metodología; y (3) el acceso a la información de esta metodología y la claridad de la información encontrada.

Tabla 1-1 Comparación de las metodologías de investigación utilizadas en el análisis de causa raíz

METODOLOGÍAS	FORMACIÓN	DISEÑO EN PAPEL O SOFTWARE		IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	RECOLECCIÓN DE DATOS	IDENTIFICACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES			ACCIONES CORRECTIVAS	METODOLOGÍA COMPLETA	DEFICIÓN CLARA DE LA METODOLOGÍA
		PAPEL	SOFTWARE			FÍSICAS	HUMANA	LATENTE			
PROACT	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
APOLLO	si	si	si	si	si	si	si	no	si	si	si
TAPROOT	si	si	si	si	si	si	no	no	si	no	no
REASON	si	si	si	si	si	si	no	no	si	no	no
DMAIC	si	si	no	si	si	si	no	no	si	no	no

Se observa en la Tabla 1-1 que las metodologías descritas tienen similitud en la aplicación de las cualidades, sin embargo la metodología que proporciona el análisis más completo de causa raíz es la Metodología PROACT.

Una de las principales ventajas de la metodología PROACT es que permite encontrar tres tipos de causa raíz, Física, Humana y Latente lo cual implica que tiene mayor alcance que las demás. Las causas físicas tienen su origen de alguna manera por la intervención humana y ésta a su vez ocurren por algún problema en los sistemas que componen las organizaciones. Estas últimas se conocen como las Causas Raíces Latentes de un evento no deseado y serán las que se reconocerán como las verdaderas causas raíces ya que al descubrir estas causas se podrá prevenir o evitar su recurrencia en el mismo equipo o sistema. Esta metodología tiene un fuerte énfasis en los factores de la organización cumpliendo así con todos los criterios establecidos para seguir con el proyecto.

Otra ventaja de la metodología PROACT es que no se necesita ser un experto para poder llevar a cabo un análisis y su entendimiento de la lógica es más sencilla que las demás. Además cuenta con un software capaz de facilitar los procesos en cada fase de la metodología.

En conclusión la metodología a seguir en este estudio es la PROACT por las ya descritas características, ventajas y comparación con las demás estudiadas.

CAPITULO 2 METODOLOGÍA ACR APLICADA A LAS CENTRALES HIDRAÚLICAS DE EPSA

En este capítulo se presenta la metodología de análisis de causa raíz escogida para ser aplicada en fallas de las centrales hidroeléctricas de EPSA. Se precisan el tipo de fallas a las que se aplicará la metodología, se presenta un paso a paso detallado lo que se debe realizar y algunas recomendaciones para cada una de las etapas del análisis. Es preciso señalar que cada paso de esta metodología ha sido elaborado a partir de la revisión bibliográfica realizada y de reuniones con los ingenieros de la gerencia de Generación de EPSA, es decir, esta metodología se ha adaptado para ser aplicada específicamente en fallas ocurridas en equipos de las centrales hidroeléctricas de EPSA.

A continuación, se describe cada uno de los pasos de la metodología.

2.1 EVENTOS A LOS QUE SE APLICARÁ EL ACR EN LAS CH DE EPSA

Se deben definir los eventos a los cuales se les aplicará el ACR en las centrales hidroeléctricas de EPSA

- Eventos que originan desviaciones de generación. (Productos No Conformes)
- Eventos que originen daños a la salud (accidente o enfermedad laboral) e impactos ambientales.
- Eventos que originen indisponibilidad mayor a 2 días en una unidad de generación.
- Eventos que ocurren con una frecuencia superior o igual a 2 veces al mes.
- Eventos que a criterio de un experto deben analizarse (feeling)
- Eventos en los cuales se desconoce la causa de la falla (ghost)
- Eventos a los cuales no se les conoce antecedentes.
- Eventos en los cuales está involucrada la fiabilidad humana.
- Eventos de muy baja frecuencia y alto impacto.

2.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Según los criterios establecidos para la comparación de las metodologías de análisis causa raíz se definió que la metodología a utilizar es la PROACT debido a que proporciona una visión global y multidisciplinaria de la falla y además entrega como resultado los tres tipos de causas raíces: Física, Humana y Latente. [9][16][17]

A continuación se describe cada una de las etapas del ACR para su aplicación en una central hidroeléctrica (CH). [9][16][17]

2.2.1 Identificación del evento o tipo de falla a analizar.

- Descripción del tipo de evento a analizar.
- Identificar la CH en falla.
- Identificar el sistema de la CH en falla.
- Identificar el elemento del sistema en falla.
- Realizar una breve descripción del Evento.
- Definir si al evento se le requiere aplicar la metodología ACR PROACT.
- Clasificar el evento según el tipo de Falla

En el **Anexo 1a** se presenta el formato correspondiente a esta etapa.

2.2.2 Conformación de equipos de análisis de eventos:

A. Definir un equipo de análisis para cada caso de evento:

El equipo de trabajo para el análisis de causa raíz debe estar conformado por personal multidisciplinario, conocedores del evento, del funcionamiento del sistema fallado y por lo menos un miembro del equipo debe estar capacitado en metodología ACR.

En el equipo se definirán los siguientes roles:

- **Facilitador:** Es la persona capacitada en la metodología ACR, debe guiar al grupo en el análisis del evento y por lo tanto debe tener claridad en los conceptos de la metodología.
- **Líder:** Persona con ascendencia que debe incentivar en el grupo una mentalidad de búsqueda de las verdaderas causas raíces.
- **Personal de operación especializado** (operadores, ingenieros eléctricos, mecánicos, etc.)
- **Personal de mantenimiento especializado** (técnicos eléctricos, mecánicos, instrumentistas)
- **Personal de planeación**
- **Personal externo especializado** (en caso de requerirse)

En el **Anexo 1b** se encuentra el formato de Conformación de equipos de análisis de fallas

B. Acuerdos de las reuniones:

Para lograr una buena comunicación se establecen los siguientes acuerdos para las reuniones de los equipos de ACR:

- Solicitar la palabra antes de hablar.
- Guardar silencio cuando algún integrante del equipo está hablando.
- Las intervenciones deben estar relacionadas con el tema que se está discutiendo en el momento.
- Se debe estructurar bien la idea, antes de hablar.
- En la etapa de la construcción del conocimiento del sistema fallado, se debe dar prioridad a las personas que conocen el proceso.
- Debe existir respeto entre los miembros del grupo (ideas, ignorancia)
- Se concluirá sobre la lógica, la razón y las evidencias de los fenómenos físicos ocurridos.

C. Responsabilidades del líder:

Las siguientes son las responsabilidades del Líder del proceso ACR:

- Citar a reuniones.
- Coordinar las reuniones.
- Hacer un listado de actividades a desarrollar.
- Definir las personas encargadas de recopilar información sobre lo sucedido el día de la falla.
- Definir personas encargadas de recopilar información encaminada a describir el funcionamiento normal y anormal del sistema fallado.
- Definir una estrategia para recopilar la información.
- Definir cronogramas de actividades y responsables.

D. Responsabilidades del Equipo:

Las siguientes son las responsabilidades del equipo del proceso ACR:

- Recopilar información
- Describir el funcionamiento normal y anormal del sistema fallado.
- Construir el árbol lógico del ACR
- Definir una estrategia para validar o descartar las hipótesis

2.2.3 Recolectar información:

- La información es el primer paso para realizar un ACR, por esto debe recopilarse de forma estructurada y precisa, esta información servirá como evidencia del evento de falla.
- La información se debe recopilar, clasificar y seleccionar de acuerdo a los objetivos planteados de la búsqueda.
- La información recopilada debe ser confiable.
- Se debe recopilar la información en los formatos establecidos.

A. Objetivos en la recolección de la información:

- Reconstruir lo ocurrido antes, durante y después de la falla.
- Comprender del funcionamiento normal de cada uno de los elementos del sistema.
- Comprender el funcionamiento normal de todo el sistema.
- Identificar las variables físicas que evidenciaron el mal funcionamiento del sistema (síntomas).
- Identificar los elementos del sistema que determinaron la pérdida parcial o total de la función del sistema.
- Identificar los mantenimientos o reparaciones del sistema donde se encontró la Falla, Información en el EAN Software

B. Recolección de información en formatos.

Para recolectar la información de manera organizada esta metodología propone utilizar la teoría de las 5P's (Posición, Parte, Papel, Personas y Paradigmas). El formato para Reporte de Fallas y eventos en centrales hidroeléctricas se encuentra en el **Anexo 1c**.

- Ubicación temporal y espacial de la falla
 - Nombre de la central
 - Piso donde ocurrió la falla
 - Identificar el sistema y la unidad fallados.
 - Fecha y hora en la que se presentó la falla
- Parte física fallada.
 - Como se evidenció la falla
 - Cuál es el Sistema que presenta falla

- ¿Algún elemento de este sistema se evidencia físicamente averiado?

- Personal relacionado con la Falla.
 - Operadores de turno antes, durante y después de la falla
 - Personas de turno de mantenimiento eléctrico, mecánico, etc.
 - Ingeniero de turno.
 - Personas que realizaron el informe de levantamiento de la falla.

- Descripción detallada de la Falla.
 - Realizar un listado de los aspectos más importantes ocurridos antes, durante y después de la falla. Condiciones Operativas.
 - Recolección de Bitácoras de la planta, donde se evidencia el listado de sucesos antes, durante y después de la falla.
 - Recolección de registros de Relés y Datos en equipos.
 - Breve descripción de lo que se evidenció por parte de los operadores y el personal en el momento de la falla. (Paradigmas relacionados con el evento)
 - Describir las ideas de lo que se evidencio, utilizando una redacción simple, breve, clara y exacta.
 - Descripción del sitio de la falla, hallazgos relevantes, fotos, tabla de eventos y hora de ocurrencia, personas en turno, impacto sobre la seguridad del personal, impacto ambiental.

C. Documentos a estudiar de los elementos del sistema fallado.

Se debe recolectar la siguiente información del sistema fallado:

- Diagramas de flujo o flujograma del sistema fallado
- Planos eléctricos, mecánicos, civiles.
- Manuales del fabricante de los equipos que integran el sistema fallado.
- Manuales de operación normal del sistema fallado.
- Registros históricos de las variables asociadas al sistema, antes, durante y después de la falla.
- Condiciones de operación antes de la falla.
- Bitácora (papel y medio magnético).
- Planes de mantenimiento.
- Ordenes de trabajos
- Informes técnicos de fallas similares
- Informe del levantamiento de la falla actual

- Evidencias físicas de la falla
- Listado de rarezas encontradas en el sitio de la falla

2.2.4 Realizar el análisis del funcionamiento de todo el sistema fallado

Se deben realizar reuniones con el personal que opera, mantiene y repara los diferentes elementos del sistema en falla. En estas reuniones se deben desarrollar los siguientes puntos:

- Realizar un diagrama de ambiente del sistema que falló. Es decir, construir un esquema donde se observen los elementos que hacen parte del sistema fallado, la interconexión entre ellos y con elementos de otros sistemas. Mostrar la interrelación mediante flechas que indican el sentido de la información.
- Realizar una tabla donde se especifiquen las señales de entrada y salida del sistema fallado. Detallar el tipo de señal: dato, variable analógica o variable binaria, especificar si es de entrada o salida del sistema, rangos de operación de las señales y unidades métricas.
- Identificar cada uno de los elementos que componen el sistema fallado.
- Construir un diagrama funcional del sistema fallado. Colocar del lado izquierdo del diagrama los datos y/o variables de entrada, en el centro los bloques con cada subfunción o elemento del sistema y su interrelación, finalmente colocar en el lado derecho del diagrama los datos y señales de salida del sistema.
- Identificar las condiciones de operación del sistema antes de la falla.
- Realizar un análisis de las señales registradas recopiladas del sistema antes, durante y después de la falla.

Es importante en esta etapa NO realizar conclusiones acerca de la Causa Raíz de este Fallo, es prematuro hacerlo y puede sesgar el juicio del análisis.

2.2.5 Generar el árbol lógico

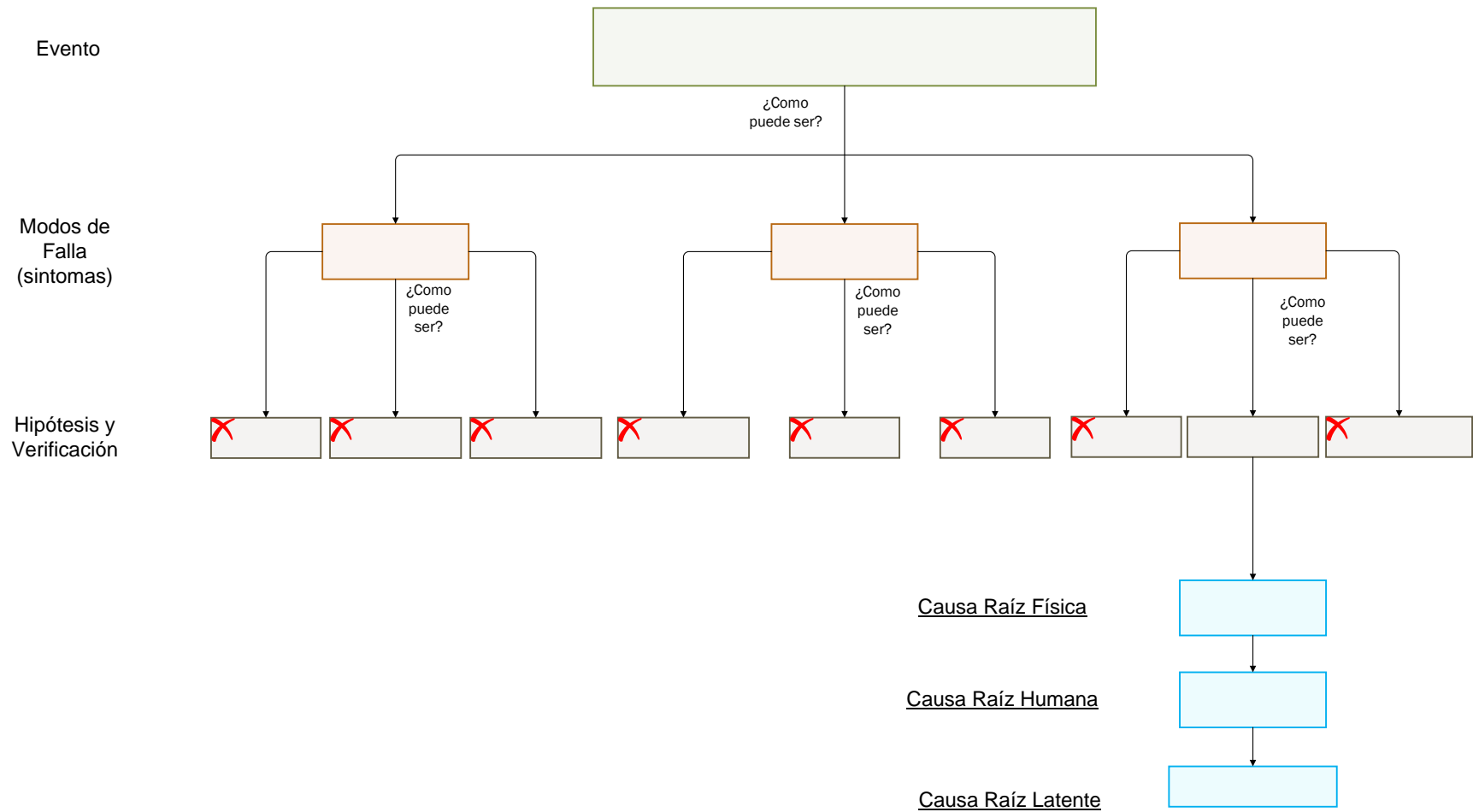
El árbol lógico es un diagrama como el que muestra la Figura 2.1, es muy importante su realización, ya que a través de él se busca:

- Representar de forma gráfica, sistémica y estructurada la LÓGICA de lo Occurrido
- Identificar el Evento y los modos ocurridos.
- Identificar las hipótesis y verificarlas para descartarlas o convertirlas en Causas.

- Identificar los niveles de las fallas de los elementos y/o componentes también llamadas Causas Directas.
- Identificar los niveles de Fallas Humanas o causas intermedias de origen de los errores humanos.
- Identificar los niveles de las causas raíces que representan las deficiencias del sistema – Organización.

El árbol de la Figura 2.1 es una guía para su construcción. La cantidad de Modos, Hipótesis y Causas, depende de las características particulares de cada evento analizado.

Figura 2-1 Modelo del Diagrama Lógico – Análisis Causa Raíz.



A. Descripción del evento a analizar.

El evento es la Falla presentada, su descripción debe hacerse de forma sencilla, precisa, explícita.

Esta descripción no incluye qué fallo y por qué, es una descripción sencilla que permite comprender la falla presentada. Así mismo, es necesario clasificar el evento según alguno de los siguientes criterios:

- **Eventos Esporádicos:**
 - Generalmente son acontecimientos dramáticos.
 - Demandan atención urgente.
 - Ocurren con poca frecuencia.
 - Consumen mucho tiempo para restaurar.
 - Eventos únicos, tienen un alto impacto.
 - Normalmente conllevan a grandes pérdidas

- **Eventos Crónicos:**
 - Generalmente aceptados como parte de la rutina.
 - Demandan atención por alta frecuencia.
 - Pequeña cantidad de tiempo para restaurar.
 - Normalmente de bajo impacto.
 - Las pérdidas USD individual por cada evento son bajas.

B. Establecer los modos de Falla (Síntomas)

El Modo de Falla es el Efecto a través del cual se observa que un activo ha fallado.

Los modos de Falla se deben entender como el síntoma, es decir la manera a través de la cual se detecta que un equipo está en estado de falla, en cualquiera de sus tipos evolución (falla crítica, falla parcial y falla potencial).

En esta etapa del proceso el equipo de trabajo debe establecer todos los posibles modos de fallas que hayan dado lugar al evento en estudio, estos modos de fallas alimentan la segunda línea del árbol lógico.

Es muy importante entender que los modos de falla no son Hipótesis ni causas, se debe tener claridad sobre su definición.

Se pueden asignar porcentajes a los modos de falla los cuales indican el impacto total causado por cada uno de ellos (Frecuencia x Consecuencias)

C. Definir las hipótesis y Verificarlas.

Posibles causas/hipótesis son la tercera etapa de la metodología ACR se pretende dar respuesta a la pregunta ¿cómo puede ser? o ¿por qué?

Cada posible causa representa una hipótesis, la cual debe ser validada o descartada por el equipo de trabajo por medio de la información obtenida.

Si con esta información no es posible tomar una decisión sobre las hipótesis, pueden aplicarse las siguientes herramientas:

- Análisis de falla: Utilizar las técnicas complementarias (Diagramas de Pareto, Espina de Pescado, Esquema de Relaciones.
- Realizar pruebas en sitio: Aislamiento, Fisicoquímico, Eléctricas, Mecánicas, etc.
- Verificación de Datos estadísticos y mantenimientos - EAM
- Verificación de registros de equipos. (Relés y Software de Control)
- Realizar nuevas entrevistas con operadores e ingenieros de la central
- Realizar consultas a Expertos

Todas las hipótesis deben ser analizadas para ser validadas o rechazadas. En caso de ser rechazadas, se descartan, pero no se eliminan del árbol lógico.

D. Determinar las causas físicas y verificarlas.

Una vez verificadas las hipótesis deben encontrarse las causas raíces físicas. Estas causas suelen ser evidentes pues están constituidas por los elementos o componentes que hacen parte del sistema y que están averiados físicamente. De esta manera, si se reemplazan dichos elementos, se elimina de forma temporal el problema.

Ejemplo: Erosión, Fatiga, Material inadecuado o Acoplamiento

E. Determinar las causas humanas y verificarlas

Son aquellas causas donde interviene el ser humano. Esta intervención de las personas puede ser la causa directa o indirecta de los eventos analizados.

En éste punto del análisis es importante tener cuidado de no tomar represalias con la (las) persona(s) que cometieron el error. El cambio de personal NO elimina el problema de fondo, solo refiere un movimiento a nivel táctico, ya que esta no es la causa raíz.

Ejemplo: Condición no observada durante las inspecciones de campo, Uso de material inadecuado y Errores en la inspección de Campo.

F. Determinar las raíces latentes y verificarlas

Son aquellas Causas RAICES donde el sistema y/o la organización permite que existan fallas humanas y estas generan fallas en los componentes, típicamente estas causas raíces están asociadas a las deficiencias latentes de la organización. Se conocen también como causas raíces sistémicas.

Ejemplo: No existen métodos de inspección, No son revisados los datos de las inspecciones, No se programan inspecciones, No existe procedimiento para alineación, No hay equipo adecuado para alinear o No hay método para acoplar equipo.

2.2.6 Determinación de medidas correctivas y preventivas

El Grupo de Trabajo debe establecer un plan de acción claro, según los parámetros de la compañía.

El plan de acción para un Evento debe buscar una manera de solucionar todos los tipos de causas raíces encontradas para evitar que vuelva a presentarse la falla en ese equipo de esa central. Además se debe compartir esta información para no tener esta falla en otras centrales de generación.

En los próximos seis meses se debe verificar la eficacia de las acciones, presentando evidencia que las recomendaciones del plan de acción fueron todas implementadas en la central.

CAPITULO 3 DESCRIPCION DEL SISTEMA EN ESTUDIO

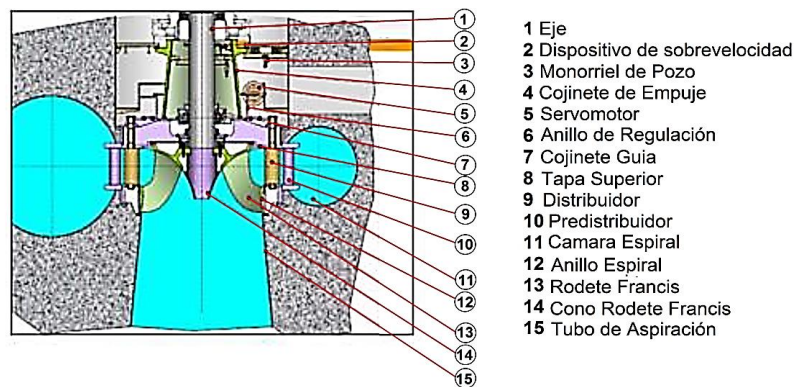
En este capítulo se presentará el sistema en falla, se explicará su funcionamiento en estado normal y los elementos que lo componen. También se mostrará la información recopilada en las visitas de evidencia de las Fallas.

3.1 INTRODUCCIÓN

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis aproximadamente en 1848 en Estados Unidos. Esta turbina es de tipo reacción, es decir que la presión del agua se dirige desde la entrada hacia la salida del rodete y además se tiene un cambio de dirección de los vectores de flujo de velocidad a través del canal de transferencia de las aspas del rodete [14]. Los elementos generales de esta turbina son: el Distribuidor que esta formador por alabes fijos y alabes móviles, el Rodete que es el encargado de realizar la conversión de energía hidráulica a energía mecánica rotacional constituido por cierto número de paletas que giran al paso del agua y también la Cámara Espiral que distribuye el agua uniformemente por todo el contorno de la entrada al rodete [14],[15]. Debido a su alta eficiencia para altas caídas y caudales, un alto porcentaje de las centrales hidroeléctricas del mundo funcionan con este tipo de turbina.

A continuación se presenta una imagen del corte transversal característico del montaje de una turbina Francis como se encuentra en la Central hidroeléctrica en estudio

Figura 3-1 Corte transversal Turbina Francis



Fuente: “Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada EPSA”.

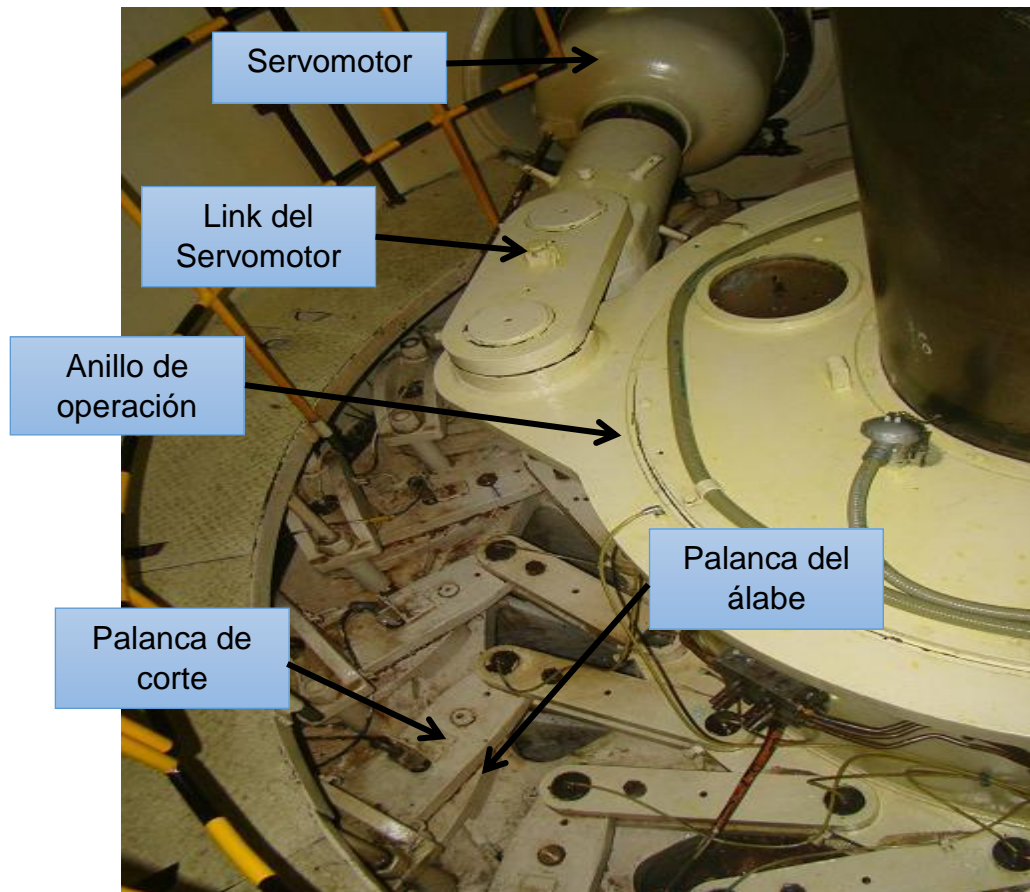
3.1.1 Distribuidor

El distribuidor de las turbinas Francis fue inventado en Alemania en 1860 y consta de una serie de partes mecánicas que permiten regular el caudal que va hacia el

rodete. Para realizar esta función el distribuidor dispone de alabes móviles que giran paralelo al eje de la máquina, haciendo movimientos de apertura y cierre con el fin orientar y acelerar el flujo de agua variando constantemente el caudal dependiendo de la carga demandada [13]. El movimiento de los alabes se logra al accionar los servomotores que simultáneamente mueven el anillo de operación que esta acoplado a las palancas y al eje del alabe, permitiendo un rendimiento elevado incluso con cargas reducidas.

A continuación en la Figura 3-2 se muestra la ubicación de los elementos mecánicos explicados anteriormente y su acoplamiento.

Figura 3-2. Partes del distribuidor de una turbina Francis de la Central Hidroeléctrica Alto Anchicaya.

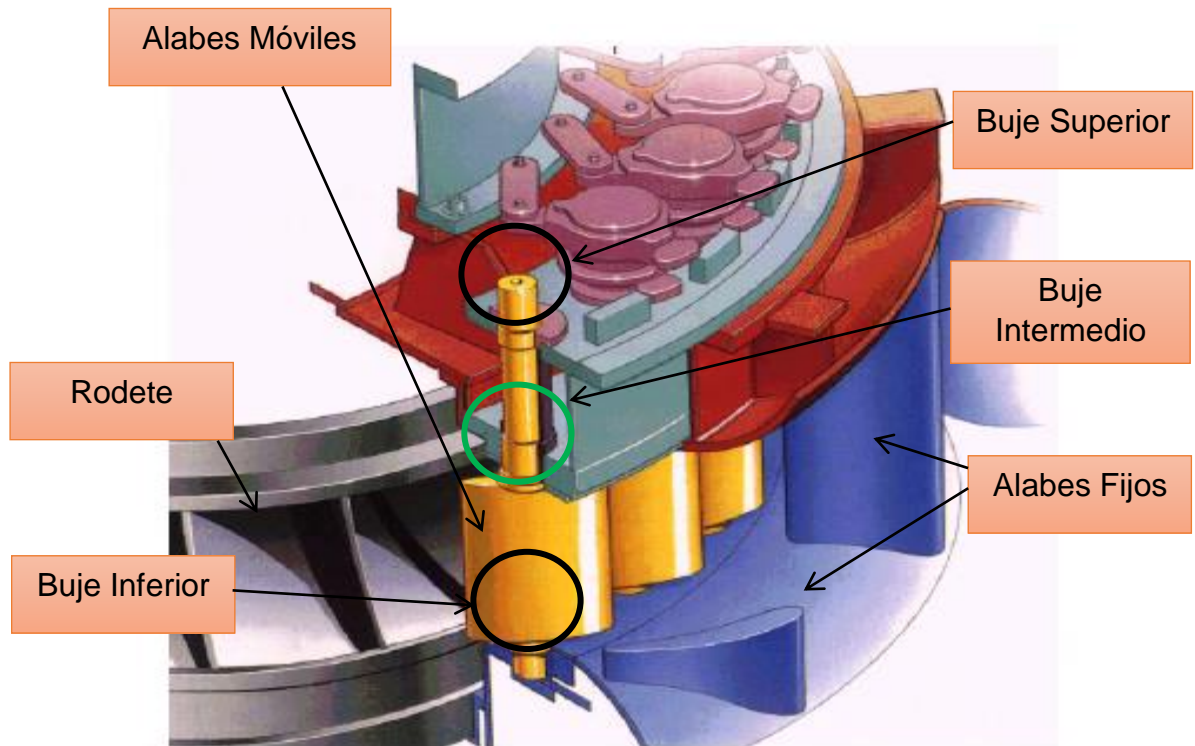


Fuente: Suministrada por personal de EPSA del distribuidor Central Hidroeléctrica Alto Anchicaya.

Además, para lograr el movimiento de los alabes estos cuentan con Bujes que permiten su libre movimiento, en la Figura 3-3 se presenta un corte transversal de este lado del distribuidor donde podemos observar los alabes Fijos que permiten

suministrar igual cantidad de agua a la entrada de los alabes móviles, los alabes móviles y los tres bujes que permiten el movimiento de estos.

Figura 3-3. Animación de un corte transversal de una turbina Francis.



Fuente: "Guide vanes in Francis turbines."

3.2 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a una falla presentada en la central de EPSA Alto Anchicayá ubicada en los municipios de Buenaventura y Dagua; la central tiene una capacidad total de 365MVA y está compuesta por tres unidades de generación cada una con una turbina Francis.

La falla a analizar es una fuga de Agua que se presenta en el buje intermedio de los alabes móviles (Figura 3-3). Las fugas de agua en una central hidroeléctrica representan pérdidas económicas altas, debido a que es agua no aprovechada para la generación eléctrica y posterior venta de energía, adicionalmente estas fugas provocan pérdida de eficiencia en las turbinas Francis por el cambio del caudal y podrían iniciar una inundación de la unidad.

Una excesiva fuga de agua en la turbina puede originar los siguientes daños secundarios:

- Corrosión que genera el crecimiento de bacterias y algas, creando un riesgo significativo para la salud del personal.
- Desgaste del material debido a los elementos abrasivos del agua.
- Degradación de las características del aceite del cojinete producido por las inundaciones parciales ocasionando falla del cojinete guía.
- Finalmente podría producirse riesgos más críticos como inundarse la Unidad e incluso la central.

Para evitar la inundación de la unidad de generación se ha instalado en cada turbina un sistema de electrobombas que envían el agua hasta un desagüe común. Esta falla ocurre en el distribuidor de los alabes de los tres grupos generadores de esta central los cuales tienen acopladas turbinas Francis.

Las turbinas de esta central cuentan con diez alabes fijos y veinte alabes móviles, estos últimos tienen la función de direccionar y acelerar el flujo hidráulico que va hacia el rodete. Cada alabe móvil está compuesto por un eje acoplado a tres bujes (superior, intermedio e inferior), como se ilustra en la Figura 3-3.

El buje intermedio se conoce en terreno como “muñón” y está compuesto por tres elementos:

- Bujes: Es una pieza cilíndrica donde se apoya y permite el giro del eje.
- Tapa y espárragos: La tapa es un elemento mecánico que evita que el buje se salga y que no haya fuga de agua y ésta está sujeta por dos espárragos metálicos.
- Empaque: Es una pieza mecánica utilizada para mantener herméticamente cerradas dos piezas distintas. Se instala al cerrar la tapa.

3.3 INFORMACIÓN RECOPIADA

La información recopilada para este análisis de falla se obtuvo por medio de visitas y entrevistas en la central del Alto de Anchicayá, se evidenció el momento y ubicación de la falla.

Esta central empezó a funcionar en el año de 1974 con tres grupos generadores acoplados a turbinas Francis y a través del tiempo se fueron haciendo pequeños cambios debido a las políticas ambientales y a avances tecnológicos.

La central cuenta con tres grupos de 126 MVA los cuales tienen un rotor con 16 pares de polos, velocidad sincrónica de 450RPM. A continuación en la Figura 3-4 se muestra uno de los rotores de los grupos generadores del Alto de Anchicaya.

Figura 3-4. Rotor del generador del Alto Anchicaya.

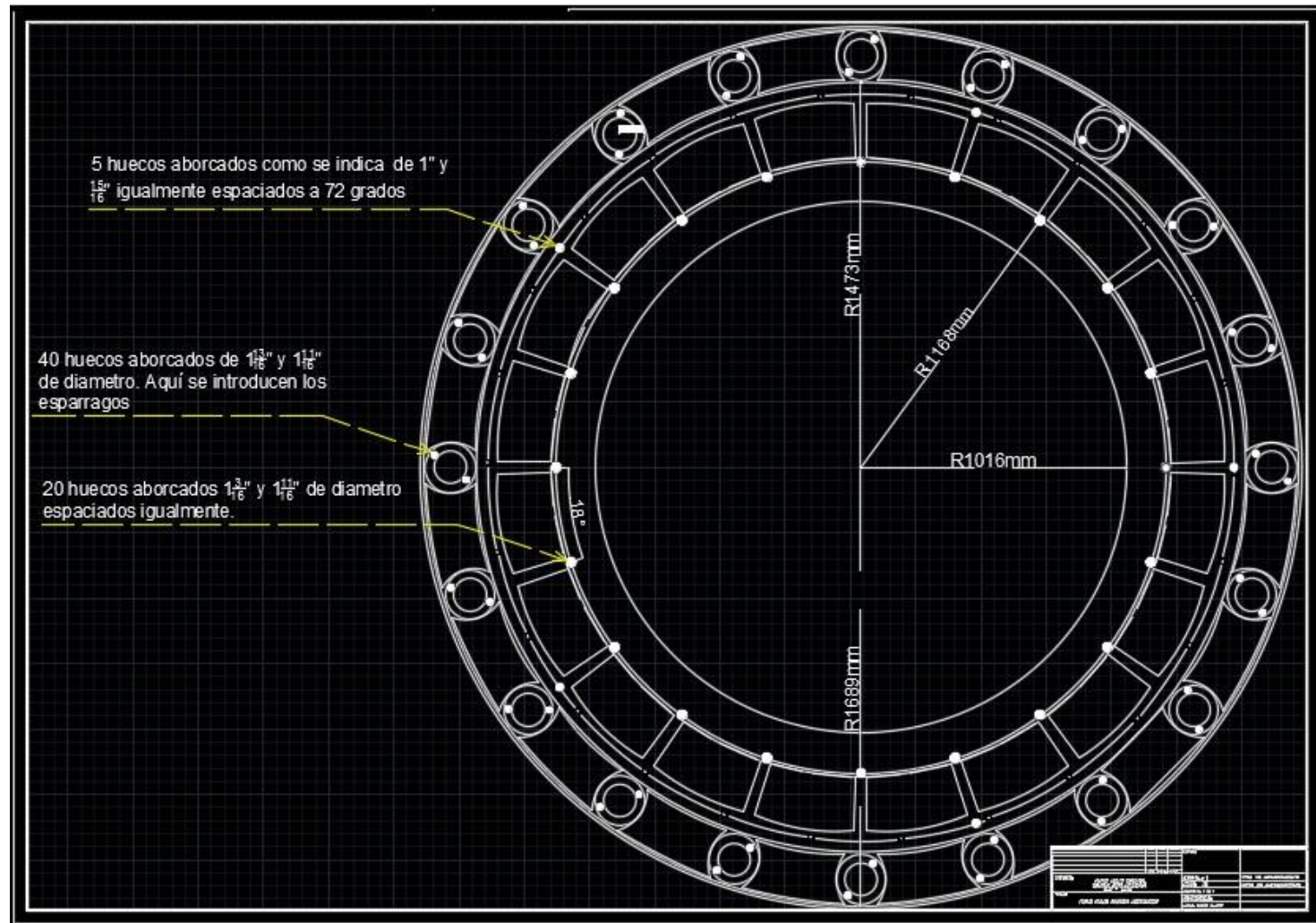


Fuente: Tomada en la Central hidroeléctrica Alto de Anchicaya.

Este rotor viene acoplado al eje de la turbina Francis, la cual transforma la energía cinética del fluido en energía mecánica que representa una velocidad medida generalmente en RPM y esta energía mecánica se transforma en energía eléctrica en bornes del generador.

Para entender la falla hemos obtenido planos de la máquina instalada en la central y nos centraremos en el plano de la vista en planta de la tapa inferior del distribuidor de la turbina Francis donde se encuentra ubicado el Buje intermedio y es el sitio de la fuga de agua. En el plano se pueden evidenciar las respectivas indicaciones de diseño. Este plano ha sido digitalizado y se presenta en la Figura 3-5. Es importante identificar los 20 puntos de los alabes móviles que llamaremos muñones y cada uno con sus dos respectivos espárragos

Figura 3-5. Plano de la tapa superior de una turbina Francis en AutoCAD.



Fuente: Digitalización propia, plano original suministrado por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

En la Figura 3-6 se muestran la parte superior del buje intermedio también llamado muñón. Este es el lugar del distribuidor donde ocurre la falla, son 20 muñones por cada turbina que es igual al número de álabes móviles. En la imagen se pueden observar algunos elementos importantes:

- Buje: En este caso el buje es el cilindro color azul que se ve debajo de la tapa.
- Espárragos: Los dos espárragos están ubicados en la tapa del muñón y evitan la apertura de la tapa del buje intermedio.
- Empaque: A pesar que no lo observamos permite el cierre hermético de la tapa del muñón.

Figura 3-6. Parte intermedia del eje de los alabes llamado Muñón o vástago.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

La fuga de agua por el muñón es verificada por inspección visual y auditiva, pues esta falla se evidencia fácilmente para los operadores de las máquinas. En la figura 3-7 se muestra el momento de la Falla en uno de los muñones.

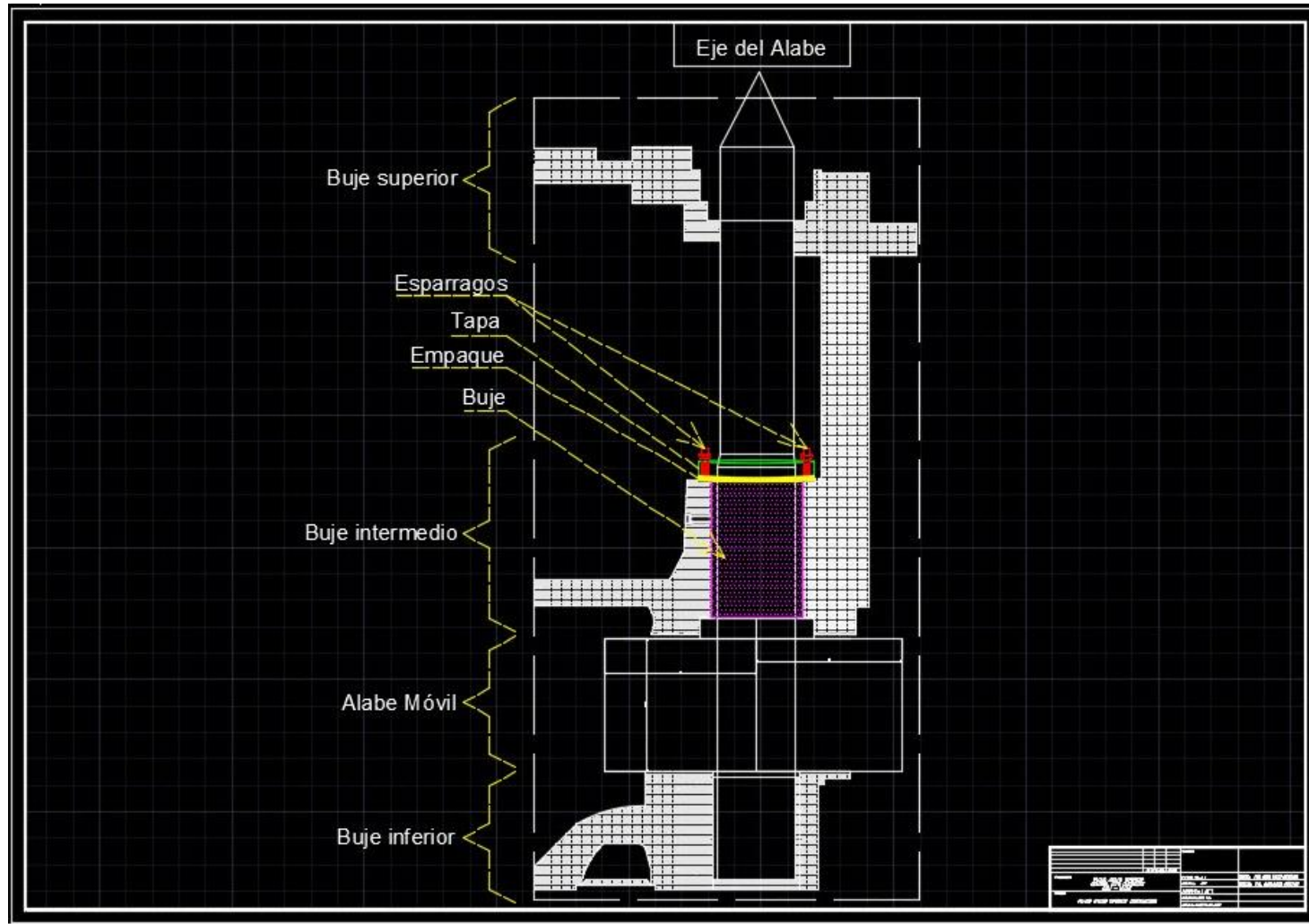
Figura 3-7. Fuga de agua por el muñón del buje intermedio.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

El muñón de los alabes está compuesto por tres elementos críticos y se consideran así porque deben ser reemplazados, lo cuales son: Buje, Espárragos y Empaque. Estos tres elementos presentan daños y desgastes al momento de la falla, y es por esta razón el análisis de falla se centrara en estos tres elementos. Para entender la ubicación de estos elementos presentamos en la Figura 3-8 un plano digitalizado del corte transversal del eje completo del álabe móvil indicando la ubicación de los elementos involucrados en análisis de fallas: Buje, Esparragos y Empaque.

Figura 3-8 Corte transversal eje del álabe móvil, Turbina Francis Alto Anchicayá.



Fuente: Digitalización propia, plano original suministrado por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

Debido a las constantes fugas de agua por los distintos muñones de la Turbina se debe tener un sistema de bombas capaces de iniciar la extracción del agua cuando se requiera y en el menor tiempo posible pues existe el riesgo de inundación de la unidad e incluso de la central si por ejemplo este sistema de bombas falla.

Figura 3-9. Motobombas que extraen el exceso de agua.



Fuente: Tomada en la Central Hidroeléctrica Alto de Anchicayá.

3.3.1 Bujes

El eje del distribuidor que permite el movimiento de los alabes móviles está acoplado a cojinetes llamados bujes, estos tienen dos funciones: permitir el giro fácil del eje para abrir y cerrar los alabes móviles y reducir las vibraciones del eje del alabe. Las superficies de rozamiento de los bujes están hechas de acero, bronce y elastómero (Termoplástico). Los bujes hechos en acero y bronce requieren un sistema de lubricación por grasera para evitar la fricción excesiva, sin embargo, al inyectar aceite cada determinado tiempo, este termina contaminando el agua que tiene contacto con el buje. Los de termoplástico no requieren lubricación con grasera debido a que su sistema es autolubricado con agua evitando la contaminación de la misma [14].

Durante los años de operación de estas máquinas se ha observado el desgaste de este elemento y se ha decidido cambiar los bujes, para realizar este cambio se requiere una parada total de la máquina pues la tapa del anillo superior sale completa y no se puede cambiar fácilmente alguno de estos bujes, estos paros totales de las máquinas se conocen como “*Overhaul*”. En la Tabla 3-1-1 se describen los cambios que se han realizado en estos elementos en cada una de las unidades de generación.

Tabla 3-1. Históricos de cambio de Bujes. Año de instalación.

Unidad Generadora \ Tipo de Buje	Bujes en bronce	Similar a Originales Fabricación nacional	Bujes en Acero con camisa	Fabricación nacional Bujes de teflón	Bujes Thordon	Tiempo de operación últimos bujes (2017)
Unidad 1	1974	N/A	Septiembre de 1997	N/A	N/A	19 años
Unidad 2	1974	N/A	Julio de 1996	2004	N/A	12 años
Unidad 3	1974	1994	NA	N/A	Octubre de 2011	5 años

Se puede concluir de la Tabla 3-1 que la primera máquina en la que se realizó el cambio de bujes fue en la unidad generadora # 3 y que la duración de estos fue de 20 años. Adicionalmente que la unidad generadora # 1 ya lleva 19 años de operación con los bujes instalados en el año 1997 de Fabricación nacional y de igual diseño que el de los bujes de bronce originales.

Actualmente la unidad generadora # 1 cuenta con bujes de Acero de Fabricación nacional y diseño similar al original, la unidad generadora # 2 cuenta con Bujes de fabricación nacional de Teflón y la unidad # 3 cuenta con bujes Thordon. Cada unidad cuenta con diferente tecnología que está siendo probada para definir cual tiene la mayor vida útil de los bujes en operación y evitar que esta falla lleve a un “Overhaul” inesperado y causante de muchas pérdidas económicas.

La Figura 3-10 muestra el tipo de bujes instalados en la central Alto Anchicayá y su material de fabricación.

Figura 3-10. Material utilizado en los bujes.



Nota: Imagen izquierda buje de teflón, imagen del centro buje en bronce, imagen derecha buje thordon de termoplástico

Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

Debido a cada buje es de diferente material y tecnología, su montaje también es diferente y se describe a continuación:

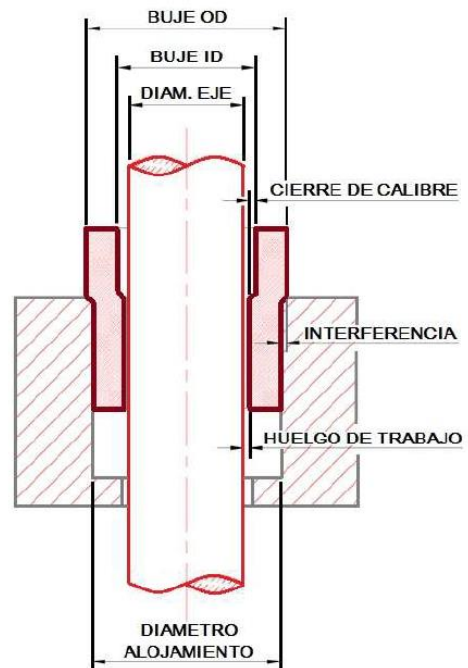
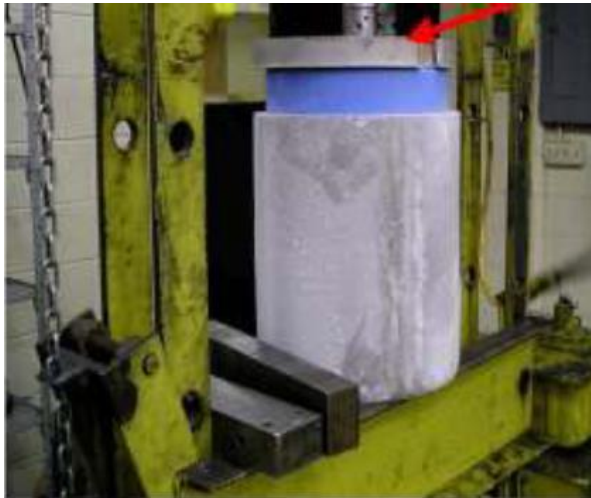
Instrucciones para la instalación de los bujes.

Hay tres métodos que se utilizan para la instalación de los bujes en la central del Alto Anchicayá que se explican a continuación:

A. Método de instalación 1: Presión con prensa de acuerdo al fabricante de bujes de la marca D-Glide. “Método tomado del Dossier Buje D-Glide, Empaquetaduras y empaques S.A.”

1. El diámetro interno del alojamiento debe estar limpio, seco y libre de polvo, al igual que las superficies de apoyo, se debe utilizar agente de limpieza que no deje residuos.
2. Si el buje tiene algún tipo de sello este debe ser removido.
3. El buje debe tener un borde de aproximadamente 15° para facilitar su instalación y lograr posicionar el buje dentro del alojamiento con un mínimo de 10 mm o más antes de presionar con la prensa hidráulica.
4. Cuidadosamente posicione el buje a la entrada del alojamiento e introduzca el buje unos 10 mm en el alojamiento a presión normal con la mano, se debe utilizar un plancha que cubra toda la superficie del buje para presionar en forma paralela a la superficie del alojamiento. Por ningún motivo se debe golpear o presionar el buje directamente sin la protección de la placa, es necesario asegurarse que el buje este verticalmente alineado con el alojamiento. Ver Figura 18.

Figura 3-11. Procedimiento #4, presión ejercida de la prensa sobre el buje y esquema de instalación a presión.



Fuente: DOSSIER BUJES D-GLIDE FC para alabes, elaboro: empaquetaduras y empaques s.a.

5. Una vez logrado el paso #4, utilizar una plancha metálica o plástica sobre el buje para lograr una mayor presión en la instalación. Posicionar el buje debajo de la prensa y comenzar a presionar en forma lenta inicialmente, luego incrementar el proceso a medida que el buje se va introduciendo en el alojamiento, de preferencia realizar este proceso en forma continua y no en forma intermitente para garantizar que la fuerza ejercida aplicada sea en línea con el centro del alojamiento.
6. Dejar el buje en el alojamiento a temperatura ambiente hasta que logre expandirse lo suficiente hasta lograr la interferencia requerida.

- Ecuación de la fuerza mínima que se debe ejercer para la instalación.

$$\text{Fuerza mínima} = \frac{\text{Int}(\text{mm}) * E \text{ de } P(\text{mm}) * L(\text{mm}) * 105}{\text{Diametro del alojamiento}}$$

Dónde:

Int (mm) = Interferencia

E de P (mm) = Espesor de la Pared

L = Largo del Buje

B. Método de instalación por presión con temperatura de acuerdo al fabricante de bujes de la marca Thordon. “*ThorPlas Dry Ice Installation Addendum to Design, Machining and Installation Guidelines, Thordon Bearings CANADA.*”

Este método utiliza una congelación de ajuste de interferencia con un ligero prensado. La refrigeración de los Bujes se puede lograr mediante la colocación de hielo seco. No se debe sumergir en nitrógeno líquido.

Se utiliza hielo seco durante 1 a 2 horas de enfriamiento para la reducción suficiente del cojinete para instalar. Medir el diámetro exterior del buje para establecer la cantidad de enfriamiento logrado antes de proceder con la prensa en la instalación.

En las Figuras 3-12 se ilustran los pasos a seguir para su instalación.

Figura 3-12. Congelación de hielo seco con fines de enfriamiento del buje para disminuir su diámetro.



Nota: el cojinete debe ser empujado con la mano antes de proceder con el prensado.

Fuente: ThorPlas Dry Ice Installation Addendum to Design, Machining and Installation Guidelines.

En la imagen se puede observar un contenedor cubierto de hielo seco, donde el buje es introducido aproximadamente por 2 horas y luego colocado en el muñon o vastago para ejercer presión con la mano y después con la prensa. En la figura 3-13 se muestra que para minimizar la cantidad de hielo seco es necesario un tubo de asistencia en medio del buje.

Figura 3-13. Tubo de asistencia media para minimizar la cantidad de hielo seco.



Fuente: ThorPlas Dry Ice Installation Addendum to Design, Machining and Installation Guidelines.

3.3.2 Empaques

Sobre el buje y para evitar que este se salga se instala una Tapa metálica pero para asegurar que por esta tapa no surjan fugas de agua se instala un empaque el cual permite mantener herméticamente selladas las piezas. Este empaque es de Nitrilo. En la central del Alto Anchicayá se instalan los empaques según un procedimiento interno que en lo largo de los años se ha ido creando para la instalación de estos empaques es necesario levantar la Tapa por esto este procedimiento incluye la desinstalación de los espárragos.

Figura 3-14. Empaques utilizados para sellar el buje intermedio de los alabes.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

A continuación se describe el procedimiento para el montaje de los empaques y espárragos.

- **Ejecución**

1. Ingresar hasta la parte superior de la turbina donde se encuentra empaque de vástago a cambiar.
2. Aflojar tuercas de sujeción de la tapa del vástago del alabe.
3. Retirar espárragos, si no están en buen estado.
4. Levantar tapa con destornilladores de pala.
5. Sujetar la tapa en la parte alta del alabe para que se pueda trabajar en la zona del empaque.
6. Extraer juego de empaques deteriorados.

7. Limpiar con aire a presión y papel absorbente la ranura donde se aloja el empaque del vástago del alabe, también debe limpiarse la superficie de contacto de la tapa y la superficie donde asienta.
8. Alistar el empaque nuevo de vástago del alabe, verificar que se encuentren en la posición correcta, que no tengan fisuras o porosidades, y que su forma sea la adecuada.
9. Colocar el empaque en una superficie plana (madera) y realizar un corte a 45° en el plano axial del empaque.
10. Aplicar grasa EP2 SHELL en el interior de la ranura donde se aloja el empaque, solo en 320° del total de la circunferencia.

NOTA: el espacio al cual no se aplica grasa es donde se hace la pega de la unión del empaque con pegante instantáneo.

11. Instalar empaque en la ranura del vástago del alabe en la posición correcta.



12. Verificar que el empaque se encuentre uniforme dentro de la ranura del vástago del alabe.
13. Pegar la unión del empaque con Loctite 495. Ver Figura 13.
14. Limpiar la parte superior del empaque.
15. Instalar espárragos nuevos ($\varnothing 1/2"$ x 4" longitud, rosca UNC, 13 hilos por pulgada, galvanizados en caliente), si fueron retirados.

NOTA: aplicar traba rosca Loctite 242 fuerza media.

16. Aplicar silicona encima del empaque y en la superficie donde ajusta la tapa.
17. Bajar la tapa del vástago del alabe y ajustarla con las tuercas (2), se aplica torque de 90 lb*pie.
18. Retirar todos los elementos del interior del área de trabajo.
19. Retirarse del sitio y hacer orden y limpieza en toda el área de la turbina.

Ejecutar este procedimiento resulta para el personal de la compañía un trabajo de mucho cuidado y en un espacio muy reducido debido a la ubicación del eje intermedio deben trabajar debajo de la tapa superior y además los alabes entre

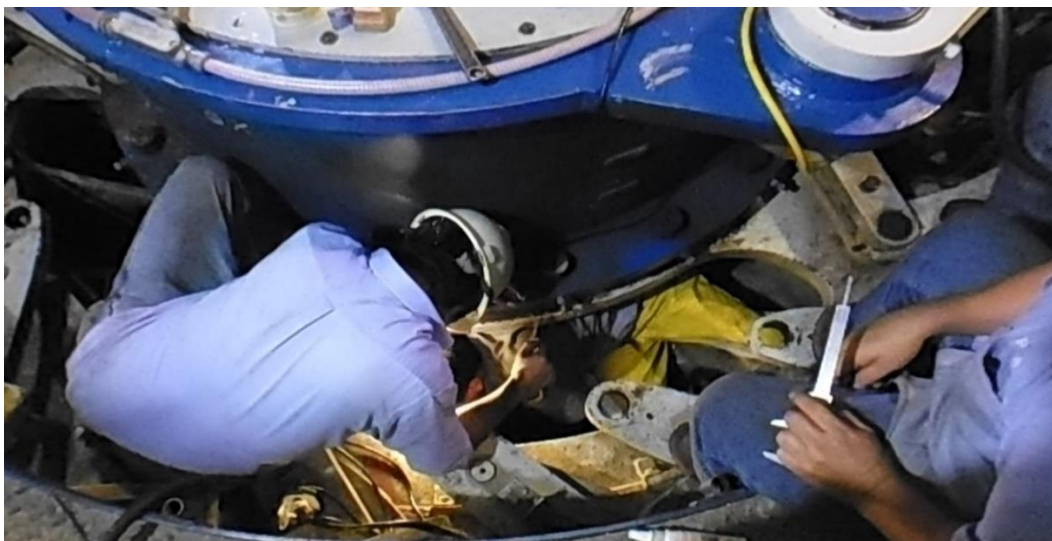
si son muy cercanos, esto puede ocasionar errores en el procedimiento de montaje. En la Figura 3-15 y 3-16 se puede evidenciar la posición del trabajador al realizar el cambio de los empaques, después de un tiempo dentro de la turbina haciendo este trabajo, el operador experimenta dolor de espalda propio de la posición y excesivo calor, dos factores que pueden influenciar mucho el resultado de la labor ejecutada.

Figura 3-15. Montaje de Empaques en los muñones de los alabes.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

Figura 3-16. Ubicación del personal para el montaje.

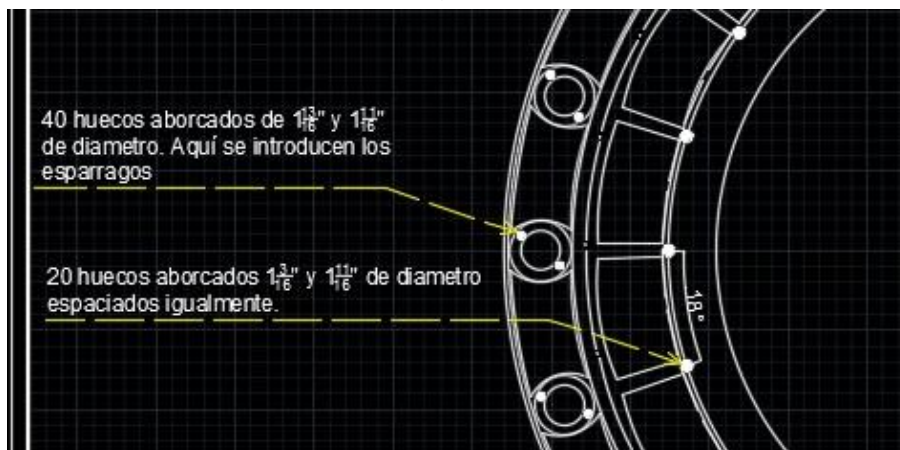


Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

3.3.3 Espárragos

Los espárragos o tornillos son elementos mecánicos que permiten asegurar dos piezas en nuestro caso sujetan la tapa de los muñones de los alabes. Cada uno de los muñones cuenta con 2 espárragos de sujeción, estos son .del tipo sinfín y están ubicados como lo muestra la Figura 3-17. No se puede olvidar que las turbinas de esta central cuentan con 20 alabes móviles y por consiguiente con 40 espárragos de estos.

Figura 3-17. Ubicación de los espárragos en la tapa superior del muñón.



Fuente: Digitalización propia, plano original suministrado por el operario mecánico del Alto de Anchicayá.

Según el procedimiento anteriormente mencionado los espárragos deben ser apretados con un torque de 90lb/pie.

En algunas de las fugas de agua por el buje intermedio se han encontrado los espárragos de sujeción de la tapa partido como lo muestra la Figura 3-18. A

Figura 3-18. Espárragos partidos luego de una falla.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya.

3.3.4 Datos de falla por Fuga de agua en el buje intermedio en los tres grupos generadores.

En las Tablas 3-2, 3-3 y 3-4 se presenta el histórico de información sobre las fallas por fuga de agua en el buje intermedio ocurridas en cada una de las turbinas y los procedimientos realizados, adicionalmente el personal encargado del mantenimiento con fecha y hora. Estos datos han sido recolectados en la planta desde el mes de septiembre de 2015.

La falla se reporta por medio de inspección visual cada 2 horas a cargo del supervisor de turno y si encuentran fuga se debe accionar manualmente el sistema de bombas.

Tabla 3-2. Historico de Fallas unidad de generación 1.

Alto Anchicaya Generador 1 del grupo																								
Nota: Bujes autolubricados en acero con un tiempo de operación de 19 años																								
Evento	Orden de mantenimiento cambio de	Fecha de la falla	Fuga de agua por el empaque del muñon numero:																		Fecha de cambio de empaques	Modo de falla	Personal de mantenimiento	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				19
1	Todos los Empaques agosto 21 al 24 del 2015	Septiembre 16 del 2015															X					Septiembre 20 hasta 21, hora 23 pm a las 8 am	Esparrago partido	Edgar Reyes , German Chavez, Edison diaz
2	Todos los Empaques agosto 21 al 24 del 2016	Septiembre 20 del 2015															X					Septiembre 20 hasta 21, hora 23 pm a las 8 am	Esparrago partido	Edgar Reyes , German Chavez, Edison diaz
3	Todos los Empaques agosto 21 al 24 del 2017	Septiembre 29 del 2015							X													Septiembre 29, hora 8 am a las 17 pm	Esparrago partido	Fernando Gonzalez, Juan Marin, Edinson Diaz, German Chavez
4	Todos los Empaques agosto 21 al 24 del 2018	Octubre 4 del 2015						X														Octubre 4, hora 8 am a las 14 pm	Esparrago partido	Juan Marin, Edgar Reyes
5	Todos los Empaques agosto 21 al 24 del 2019	Octubre 5 del 2015																X				Octubre 5, hora 7 am a las 14 pm	Esparrago partido	Juan Marin, Edgar Reyes
6	Empaques y esparragos octubre 12 del 2015	Octubre 8 del 2015						X														Octubre 12, hora 15 pm a 23 pm	Esparrago partido Cojinete dañado	German Chavez, Hector Fabio,
7	Empaques y esparragos octubre 12 del 2016	Octubre 13 del 2015														X						Octubre 13, hora 10 am a 12 pm	Esparrago partido Cojinete dañado	Edgar Reyes, Juan Marin
8	Empaques y esparragos octubre 12 del 2017	Octubre 13 del 2015															X					Octubre 13, hora 10 am a 18 pm	Esparrago partido Cojinete dañado	Edgar Reyes, Juan Marin
9	Esparragos sincados por petroleros 1/2",13 de octubre	Octubre 13 del 2015																X				Octubre 13, hora 10 am a 18 pm	Esparrago partido Cojinete dañado	Edgar Reyes, Juan Marin
10	Esparragos sincados por petroleros 1/2",13 de octubre	Octubre 14 del 2015	X																			Octubre 15, hora 7 am a 12 pm	Desgaste del empaque	Edgar Reyes, Juan Marin, Edinson Diaz
11	Esparragos sincados por petroleros 1/2",13 de octubre	Octubre 25 del 2015														X						Octubre 28, hora 7 am a 11 am	Esparrago partido	Juan Marin, German Chavez
12	Empaques y esparragos octubre 12 del 2021	Octubre 28 del 2015						X														Octubre 28, hora 11 am a 15 pm	Desgaste del empaque	Juan Marin, German Chavez

Fuente: Tabulación de información entregada por operarios de la compañía.

La Tabla 3-2 Historico de Fallas unidad de generación 1 muestra que se han presentado 14 fallas en menos de un año y son originadas en los álabes número 1, 7, 8, 14, 15, 16 y 17 en algunos casos las fallas se presentan pocos días después de realizar el mantanimiento y también se repite en el mismo álabe

como por ejemplo en el álabe 8, el cual presentó la primera falla por espárragos partidos el 29 de septiembre de 2015 y en menos de un mes presentó tres fallas por fuga de agua.

Tabla 3-3. Historico de Fallas unidad de generación 2.

Alto Anchicaya Generador 2 del grupo																						
Nota: Bujes de teflon autolubricados con un tiempo de operación de 12 años																						
Evento	Orden de mantenimiento cambio de	Fecha de la falla	Fuga de agua por el empaque del muñón numero:																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Todos los empaques 15 al 18 de julio del 2015	Octubre 14 del 2015						X														
2	Todos los empaques 15 al 18 de julio del 2015	Octubre 15 del 2015						X														

Fuente: Tabulación de información entregada por operarios de la compañía.

En la Tabla 3-2 Historico de Fallas unidad de generación 2 muestra que se han presentado 2 fallas muy seguidas y en el mismo álabe 6. La manera de evidenciar la falla es primero debido a un esparrago sin rosca ya muhas veces a acusa del esfuerzo, luego se procede a hacer cambio de todos los empaques y al día siguiente el mismo muñón presenta de nuevo la falla por empaque y esparragos.

Tabla 3-4. Historico de Fallas unidad de generación 3.

Alto Anchicaya Generador 3 del grupo																						
Nota: Bujes termoplasticos autolubricados Thordon con 5 años de operación.																						
Evento	Orden de mantenimiento cambio de	Fecha de la falla	Fuga de agua por el empaque del muñón numero:																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Todo los empaques 7 al 13 de marzo del 2015	Septiembre 17 del 2015															X					

Fuente: Tabulación de información entregada por operarios de la compañía.

En la Tabla 3-3 Historico de Fallas unidad de generación 3 muestra que solo se tiene una falla que ocurrió en el muñón número 15.

Al analizar los datos de históricos de fallas obtenidos en la central de alto Anchicayá a partir de septiembre de 2015 se encuentra que la unidad de generación 1 es en la que se presentan más fugas de agua por los bujes intermedios esto tiene una relación directa con el tiempo de operación de los bujes, pues en esta unidad los fueron instalados en el año 1997 hace 19 años. Los bujes de la unidad de generación 2 fueron instalados en el año 2004 y tienen 12 años de operación, las fugas de agua por los bujes intermedios en esta central es sólo en un alabe un par de veces. Mientras que los bujes de la unidad de generación 3 fueron instalados en el 2011 y tienen 5 años operación y solo se ha presentado una falla en uno de los bujes intermedios. La figura 3-19 muestra

la relación entre años de operación y número de fallas por fuga de agua encontrado en las unidades de generación de la central del Alto Anchicayá.

Figura 3-19 Histórico de Fallas por unidad.



Fuente: Tabulación de información entregada por operarios de la compañía.

Uno de los aspectos que llaman la atención de este análisis de histórico de fallas es la repetitividad de las fallas en tiempos muy cortos después de realizado el mantenimiento y algunos días después. Esto nos lleva a realizarnos preguntas acerca de la instalación de los elementos: ¿Se está realizando el procedimiento correcto en los mantenimientos? ¿Está afectando la dificultad del montaje a los operadores de mantenimiento? ¿No estamos solucionando la raíz del problema? Por esta repetición se ha decidido iniciar el Análisis Causa Raíz para este problema.

CAPITULO 4 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ APLICADO A UNA FALLA CRÍTICA EN LA CENTRAL ALTO DE ANCHICAYA

En este capítulo se desarrolla la metodología Análisis Causa Raíz propuesta en el capítulo 2 de este documento para el caso de estudio propuesto, se utilizarán los formatos de los Anexos. Para el desarrollo de la metodología se plantearán Modos de Fallas, Hipótesis de Fallas y se encontrarán las causas raíces físicas, Humanas y Latentes.

4.1 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

En la central hidroeléctrica llamada Alto Anchicayá existe una Falla que preocupa al personal operativo. Lo primero que se debe hacer es diligenciar los Formatos propuestos en el Capítulo 2 de este Documento.

4.1.1 Diligenciamiento de formatos.

El primer formato está en el Anexo 1a de este documento y se procede a diligenciarlo.

 EPSA <small>Una empresa CELSIA</small>	REPORTE DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-01-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 2
--	--	---

1. Datos Iniciales

Fecha del Reporte	ABRIL 18 DE 2017
Fecha y Hora de la Falla	FALLA CONSTANTE
Central Hidroeléctrica	Alto Anchicayá
Sistema en Falla	Distribuidor de los alabes
Elemento en Falla	Buje intermedio del Alabe Móvil
Operadores de Turno	-
Técnicos de Turno	-
Ingeniero de Turno	-

Descripción del evento
¿Qué sucedió?
Fuga de agua por los muñones de los alabes de turbina de los grupos generadores de la central Alto Anchicayá.
¿Cómo se evidenció la falla? (Chisporroteo, Olor a quemado o Sonidos Extraños)

Se evidenció de forma Visual. Pues se ve la fuga en el distribuidor como en la Figura 3-7
¿Se encuentra algún elemento físicamente Averiado?
Desde la inspección visual no se alcanza a observar pero ya tenemos datos históricos de esta falla
¿Tiene Fotografías?
Si se cuentan con fotografías

	REPORTE DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-01-ACR-GEN V 1.0 Hoja 2 de 2
---	--	---

2. Caracterización del Evento


Criterios de caracterización del evento	SI	NO	N.A.
¿El Evento origina desviaciones de generación? (Productos No Conformes)		X	
¿El Evento origina daños a la salud (accidente o enfermedad laboral) o impactos ambientales?		X	
¿El Evento origina indisponibilidad mayor a 2 días en una unidad de generación?		X	
¿El Evento ocurre con una frecuencia superior o igual a 2 veces al mes?	X		
¿Alguien Recomendo que este evento debía Analizarse? (Criterio de un experto - feeling)	X		
¿Se le desconoce la causa de la falla (ghost) al Evento?		X	
¿Es primera vez que Ocurre el Evento en la Central?		X	
¿En el Evento está involucrada la fiabilidad humana?		X	
¿El Evento es de Baja Frecuencia o Alto Impacto?	X		
¿Es necesario aplicar la metodología ACR?	X		

Firma

Ingeniero Jefe de Planta

Según los datos diligenciados en este formato la Falla de Fuga de agua cumple 3 de los criterios que indican que se debe iniciar un Análisis Causa Raíz, los criterios son: El evento ocurre con una frecuencia mayor a 2 días en una unidad de generación, Un experto recomendó analizar este evento y el evento es de Alto Impacto, por estas tres razones debe iniciar la aplicación de la metodología en la compañía para el análisis de esta Falla.

Continuando con la metodología ACR iniciada para la Falla a analizar, se procede a realizar la conformación de los equipos de trabajo. Para esta etapa también se ha creado un formato que esta adjunto en el **Anexo 1b.** . A continuación se presenta el formato diligenciado para este caso.

	<p>CONFORMACIÓN EQUIPOS DE ANALISIS DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS</p>	<p>F-02-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1</p>
---	---	---

1. Datos del evento

Fecha del Reporte	ABRIL 18 DE 2017
Fecha y Hora de la Falla	FALLA CONSTANTE
Central Hidroeléctrica	Alto Anchicayá
Sistema en Falla	Distribuidor de los alabes
Elemento en Falla	Buje intermedio del Alabe Móvil
Jefe de Planta	Ing. Danny Ramirez

2. Conformación de equipos de análisis de eventos

Facilitador del proceso (Experto ACR):

JUAN DAVID ORTEGÓN HENAO

Facilitador: Es la persona capacitada en la metodología ACR, debe guiar al grupo en el análisis del evento y por lo tanto debe tener claridad en los conceptos de la metodología.

Lider del proceso:

PEDRO CASTRO

Personal de operación especializado (operadores, ingenieros eléctricos, mecánicos, etc.)
Ingenieros: Javier Cárdenas, Danny Ramírez y Jaime Noguera
Operadores:
Técnicos


Personal de mantenimiento especializado (técnicos eléctricos, mecánicos, instrumentistas)
Ingenieros:
Operadores:
Técnicos: Luis Fernando Villegas, Edgar Reyes, German Chávez y Edinson Díaz

Personal de planeación. (Proyectos de la Compañía)
Mauricio Martínez
¿Se requiere Personal externo especializado ?
No se requiere personal externo para realizar este análisis.

Firma

Ingeniero Jefe de Planta

El equipo de ACR conformado debe iniciar la investigación y adjuntar la información acerca de esta Falla. Para verificar lo que se ha recolectado se debe diligenciar el Formato del Anexo 1c. A continuación se presenta el formato diligenciado para este caso.

	RECOPILAR INFORMACIÓN DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-03-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 2
---	---	--------------------------------------

1. Datos del evento (Posición)


Fecha del Reporte	ABRIL 18 DE 2017
Fecha y Hora de la Falla	FALLA CONSTANTE
Central Hidroeléctrica	Alto Anchicayá

Sistema en Falla	Distribuidor de los alabes
Elemento en Falla	Buje intermedio del Alabe Móvil

2. Personal Relacionado con la falla

Operadores de Turno	
Antes de la falla	
Durante la Falla	
Despues de la Falla	
Mantenimiento Eléctrico	
Mantenimiento Mecánico	
Ingeniero de Turno	
Personal que evidenció la Falla	

NOTA: El campo de personal relacionado con la falla no será diligenciado porque esta falla es constante, todo el personal de la central conoce esta falla y la ha observado.

	RECOPILAR INFORMACIÓN DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-03-ACR-GEN V 1.0 Hoja 2 de 2
---	--	---

3. Información para el análisis (Papel)

Descripción	SI	NO	N.A.
Diagramas de flujo o flujograma del sistema fallado	X		
Planos eléctricos, mecánicos, civiles.	X		
Manuales del fabricante de los equipos que integran el sistema fallado.	X		
Manuales de operación normal del sistema fallado.	X		
Registros históricos de las variables asociadas al sistema, antes, durante y después de la falla.	X		
Condiciones de operación antes de la falla.	X		
Bitácora (papel y medio magnético).	X		
Planes de mantenimiento.	X		
Ordenes de trabajos	X		

Informes técnicos de fallas similares		X	
Informe del levantamiento de la falla actual	X		
Evidencias físicas de la falla	X		
Listado de rarezas encontradas en el sitio de la falla	X		

4. Paradigmas

¿Se encontró alguna rareza en el proceso? (Malos Procesos o Mal uso de los Equipos)


Paradigmas en malos procesos o mal uso de los equipo no se encontraron.

Firma (Líder del Proceso ACR)

Cargo

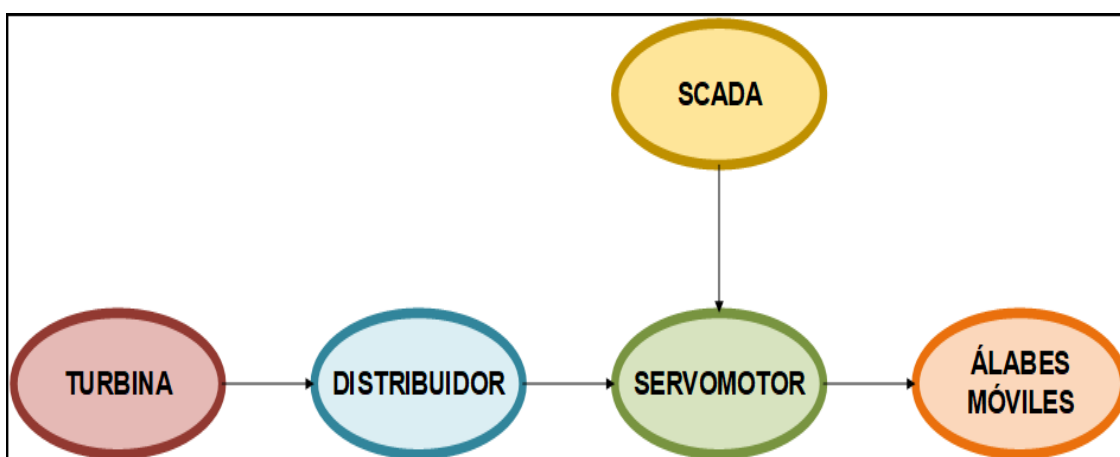
En el análisis de esta falla y en el diligenciamiento del formato anterior no es relevante llenar el Item 2 llamado “Personal relacionado con la Falla” pues la falla que se está analizando es una falla constante donde todo el personal de la planta la conoce, la ha observado y entiende la dificultad de esta Fuga de agua.

El siguiente formato a diligenciar propone construir un Diagrama de ambiente, con este se invita al equipo de análisis de ACR que por medio de un gráfico presente la interacción de los elementos relacionados con la Falla. A continuación se presenta el formato diligenciado para este caso.

	DIAGRAMA DE AMBIENTE DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-04-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1
---	---	---

1. Diagrama de ambiente.

El diagrama de ambiente permite identificar los elementos que interactúan con el sistema Analizado de manera general. Adicionalmente entre estos se unen con flechas que indican el camino de la información (Entradas y/o Salidas). Es un diagrama de Contextualización del sistema.




Nombre (Lider Proceso

ACR)

Cargo

A continuación, en el siguiente formato debe diligenciarse una tabla de señales relacionadas con el evento, esta permitirá al equipo de trabajo entender sobre que señales se debe investigar, medir y estudiar los registros. Se presenta el formato diligenciado para este caso.

	<p>TABLA DE SEÑALES DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS</p>	<p>F-05-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1</p>
---	---	---

1. Tabla de Señales

La tabla de señales permite crear un listado de las señales relacionadas con el evento analizado además que permite clasificarlas y ver sus rangos normales de operación. Con esta información el equipo de trabajo puede confirmar en que estado estaban sus Señales Antes, durante y después de la falla.

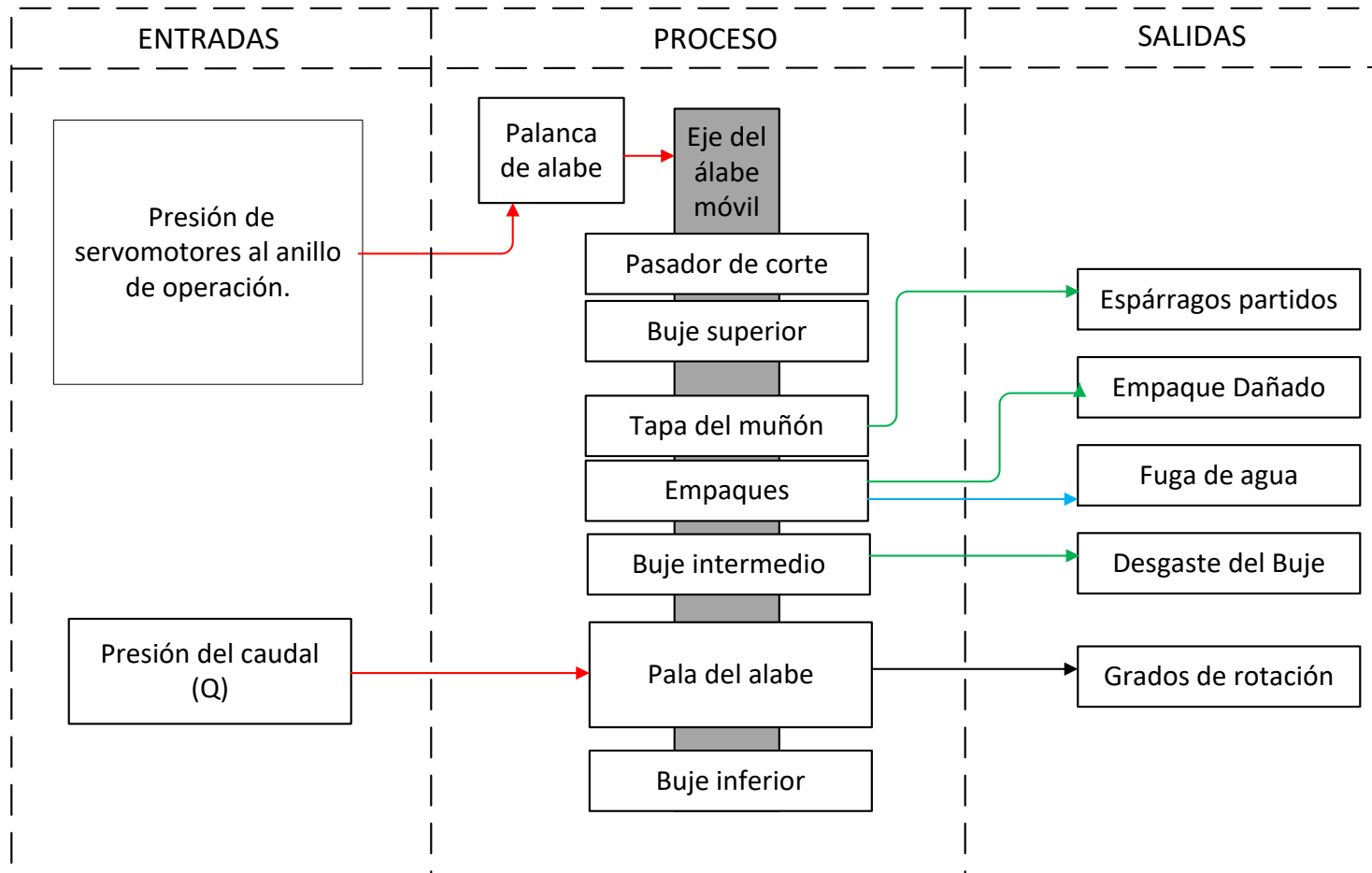
Nombre	Entrada o Salida	Tipo (Binaria - Analoga, etc)	Rango	Unidad métrica
Presión servomotor	Entrada	Analoga	20-25	kgf/cm ²
Presión caudal	Entrada	Analoga	3.5-4.0	Megapascal (MPa)
Fuga de agua	Salida		Chorro	
Grados de rotación	Salida	Analoga	0-90	Grados

Nombre (Lider Proceso ACR)

Cargo

El último formato a diligenciar para el análisis de causa raíz consiste en la construcción del Diagrama Funcional del proceso de falla. Este es una representación gráfica del proceso del sistema fallado y se indican el flujo de señales con su respectiva interconexión. A continuación, se presenta el formato diligenciado para este caso.

Diagrama Funcional



4.1.2 Estudio de información recolectada.

La información de la falla se recolectó por medio de visitas a la central del Alto Anchicayá donde se desarrollaron preguntas, entrevistas y consenso sobre algunos temas. A continuación se presentan los resultados de cada una de las visitas.

Primera visita del 20 al 24 de Junio de 2016.

La primera visita fue de acercamiento y conocimiento del sistema en Falla, lo primero fue contextualizarse en las partes de la máquina relacionada con la Fuga de Agua. El señor Luis Fernando Villegas nos explicó el funcionamiento en régimen normal del sistema, de las partes relacionadas y lo que él observa cuando informan que en la unidad de generación hay fuga de agua. Adicionalmente nos hizo entrega de documentos relacionados con la falla como planos, fotografías, datos históricos de la falla a partir de septiembre de 2015, manuales de los fabricantes de los elementos en falla y un documento de pre análisis de causa raíz realizado por los ingenieros Pedro Castro y Jaime Noguera.

En esta visita se pudieron obtener fotografías que servirán de evidencias Figura 3-7, Figura 3-18, Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3 para el análisis ACR .

Figura 4-1 Fuga de agua Generador 1 Alabe #8, Septiembre de 2015.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicayá

Figura 4-2 Fuga de agua Generador 1 Alabe #8, Octubre de 2015



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya

Figura 4-3 Esparrago de la tapa del álabe #8 Generador 1



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicaya

Segunda visita del 20 al 24 de Junio de 2016.

• Entrevista

Posterior a la primera visita, se plantearon una serie de preguntas que nos permitirán aclarar, verificar, descartar y encontrar la mejor manera de continuar el análisis. Estas preguntas fueron resueltas a través de una segunda visita realizada a la planta y en una entrevista con el ingeniero mecánico Pedro Castro Líder del proceso ACR.

Pregunta # 1: ¿Existe alguna normatividad para la construcción de los bujes del distribuidor de las turbinas Francis? ¿Es nacional o internacional? ¿Cómo eligen la tecnología del Buje a Instalar?

Respuesta: No se tiene una normativa específica para la construcción de los bujes. El diseño de los bujes se realiza a partir del cálculo de las presiones hidrostáticas a las cuales están sometidos y mediante las ecuaciones de presión por interferencia requerida. Actualmente en el mercado se conocen dos tecnologías de bujes, la primera Thordon que asegura una presión de diseño máxima de 55Mpa y la segunda D-Glide que asegura una presión de diseño de 117Mpa, ambos materiales cumplen la presión requerida por el sistema y se podría trabajar con cualquiera de ellos.

Los primeros bujes que tenía la máquina eran de bronce y pinados, el desgaste por la operación y las políticas ambientales de la compañía no permitieron comprar de los mismos debido a que la lubricación de estos era por grasera y contaminaban el agua que pasaba por la turbina. Por esto los nuevos bujes son autolubricados por agua y no necesitan grasera

Pregunta # 2: ¿Existe mayor presión en algún muñón especial debido a su ubicación geométrica en el distribuidor de la entrada de agua?

Respuesta: Verificando los planos de las máquinas y revisando en sitio se observó que los alabes más próximos a la entrada de agua son los número 5 y 6. Adicionalmente se concluyó que la presión de entrada de agua en los alabes móviles es igual para todos debido a que los alabes fijos tienen como principal función ingresar iguales cantidades agua hacia cada uno de los alabes móviles.

Pregunta # 3: ¿Qué fabricantes realizan este tipo de Bujes? ¿Garantiza algún tiempo de Vida útil sobre el buje? ¿Indican cuál es la tecnología de ensamble de este Buje?

Respuesta: En el momento se tienen dos fabricantes de estos bujes autolubricados D-Glide y Thordon, estos fabricantes garantizan un tiempo de vida de 15 años. Cada uno de los fabricantes entregan un instructivo de montaje e instalación. Esta metodología se presentó en el Capítulo 3 de este documento.

Pregunta # 4: ¿Cómo se evidencia que hay una falla en el Muñón?: Fuga de Agua o Sonidos Extraños debido a que el alabe móvil no se encuentra en una posición fija, Olor a quemado o por el encendido del sistema de Bombas.

Respuesta: Dependiendo de la falla se evidencia fuga de agua o tornillos partidos, el supervisor cada dos horas debe realizar una ronda de inspección visual. Actualmente no se tiene instalado sistemas de medición de fuga de agua en línea que permita actuar de manera inmediata.

Pregunta # 5: ¿Por qué tienen que ser tres empaques pegados en vez de ser uno solo compacto? ¿Cuál es mejor material que se maneja en esta clase de empaque?

Respuesta: Por el modo de instalación pues estos deben ser cortados para entrar en el eje del álabe móvil y tener un solo corte en un gran empaque sería muy arriesgado por falla del empaque mientras si se instalan tres empaques más pequeños, los cortes quedan separados y si alguno falla quedan dos de respaldo. No se ha investigado sobre materiales de empaques.

Pregunta # 6: ¿Existen otras centrales con turbinas Francis donde se presente este daño en los muñones? ¿Qué antigüedad tiene esas Plantas y que material de bujes se manejan? ¿Se tienen históricos de datos?

Respuesta: El 90% de las centrales de EPSA se manejan con turbinas Francis y en la mayoría se presenta esta falla. Es muy difícil conseguir la información en las otras centrales por esta razón solo se hace este análisis inicial en esta central.

Pregunta # 7: ¿Cuánto tiempo se demoran haciendo un cambio de las partes de la maquina llamado como Overhaul?

Respuesta: un Overhaul dura aproximadamente 120 días. La única manera de cambiar los bujes intermedios de los álabes móviles es haciendo un Overhaul de la máquina por esta razón se hace cada 20 años pues el lucro cesante es muy elevado al parar la maquina 120 días. Esto nos lleva a buscar los bujes con menor tasa de desgaste.

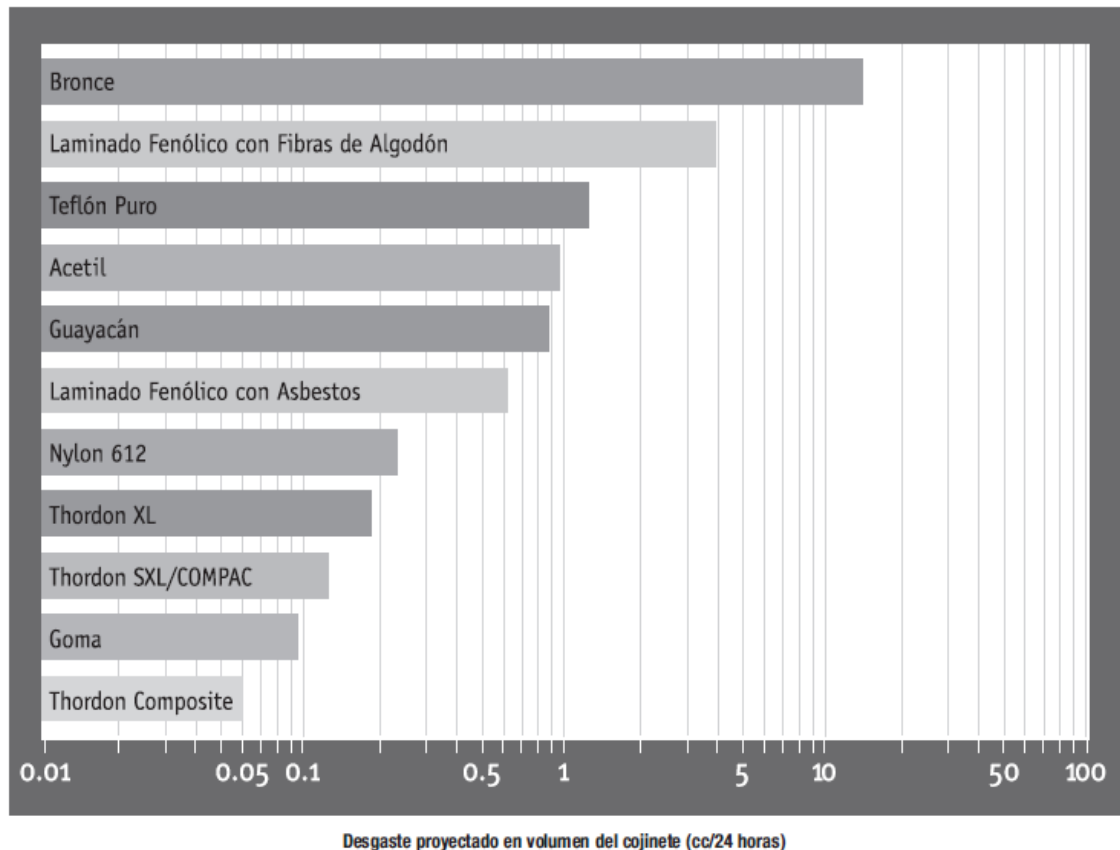
Pregunta # 8: ¿Cuáles son las normas sobre el empaque, buje, espárragos o normas del distribuidor?

Respuesta: No se tienen normas para estos implementos, estos se elaboran de acuerdo al plano original de las máquinas, las fichas técnicas entregadas por el fabricante y a la tecnología que maneje el contratista.

Adicional a esta entrevista se obtuvieron documentos de los fabricantes de los bujes como manuales de ingeniería de aplicaciones en hidro-turbinas.

Este documento presenta un ensayo realizado por el Laboratorio Independiente de la Universidad de Cincinnati (USA). Esta prueba consiste en instalar cada tipo de buje en una máquina de prueba que utiliza material abrasivo. Los resultados del desgaste de cada tipo de buje se presentan en la Figura 4-4.

Figura 4-4. Promedio del desgaste abrasivo para cojinetes típicos con distintos materiales.



Fuente: THORDON BEARINGS INC., “*MANUAL DE INGENIERIA*,” Versión SE 1. 2008. info@thordonbearings.com. <http://www.thordonbearings.com>.

El resultado obtenido por este laboratorio muestra dos cosas: La primera que el material con mayor tasa de desgaste es el Bronce y de este material eran los bujes originales de las máquinas de la central del Alto Anchicayá, esto se puede interpretar como cambio tecnológico. La segunda es que el material con menor tasa de desgaste es el Thordon Composite, un material que utiliza esta fábrica en sus bujes.

En este momento se procederá a calcular la presión de trabajo que actúa en el buje intermedio de los álabes para las unidades de la central hidroeléctrica del ato Anchicayá.

- **Datos iniciales.**

Tipo de Turbina	Francis - Vertical
Potencia (HP)	157,811
Caída de Agua (m)	400
Flujo (m3/s)	43.3
Velocidad del Rotor (RPM)	450
Presión Servomotor (kg/cm2)	24.6
Peso del Rodete (ton)	196.4

Para iniciar el cálculo de la presión de trabajo que actúa en el buje intermedio, necesitamos hacer un proceso de cálculo:

Iniciamos calculando la presión del agua por la altura de caída:

$$Presión = \rho * G * H, \left[\frac{kg}{m*s^2} \text{ ó Pascal} \right] \quad (1)$$

Donde,

$$\rho = \text{Densidad del agua} = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$G = \text{Gravedad} = 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$H = \text{Altura de Caída} = 400 [m]$$

Entonces,

$$P = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 400 [m] = 3.92 * 10^6 [Pa] = 3.92 \frac{N}{mm^2}$$

Luego buscamos la fuerza que soportan los alabes por la presión ejercida por el agua así,

$$F = P * A, [N] \quad (2)$$

Donde,

$$A = \text{Área del Alabe} [mm^2]$$

$$P = \text{Presión que actúa en el alabe} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Luego,

$$\text{Área del Alabe } (A) = A * B, [mm^2] \quad (3)$$

Donde,

$$A = \text{Altura del Alabe } [mm] = 250 [mm]$$

$$B = \text{Ancho del Alabe } [mm] = 562 [mm]$$

Entonces,

$$A = 250 * 562 = 140,500 \text{ mm}^2$$

Luego la Fuerza que actúa en los alabes es,

$$F = 3.92 \left[\frac{N}{mm^2} \right] * 140,500 [mm^2] = 550.76 [kN]$$

Ahora se debe calcular la fuerza que soportan los alabes por la presión de los servomotores, luego sumarla con la fuerza calculada por la presión del agua,

La Presión de trabajo de los servomotores $24.6 [kgf/cm^2]$:

$$\text{Área Servomotor 1: } 1,842.5 [cm^2]$$

$$\text{Área Servomotor 2: } 2,024.5 [cm^2]$$

$$\text{Área total Servomotores: } 3,867 [cm^2]$$

Fuerza total de los servomotores que actúa sobre los Alabes:

$$F = P * A, [N]$$

$$F = 24.6 \left[\frac{kgf}{cm^2} \right] * 3867 [cm^2] = 95,128.2 [kgf] = 932.888 [kN]$$

Ahora se procede a calcular la Fuerza total que actúa sobre Alabes como la suma de las dos fuerzas, una debida al agua y otra debida a los servomotores:

$$\text{Fuerza Total en los alabes: } F_{\text{agua}} + F_{\text{servo}} = 550.76 + 932.88 = 1483.64 \text{ kN}$$

Calculo de presión basado en la presión de los servomotores.

La fuerza de reacción **R** estimada en cada uno de los bujes es:

$$\text{Buje Superior: } R_A = 0.5 * F [kN] \quad (4)$$

$$\text{Buje Intermedio: } R_B = 0.85 * F [kN] \quad (5)$$

$$\text{Buje Inferior: } R_C = 0.5 * F [kN] \quad (6)$$

$$R_A = 0.5 * 1483.64 [kN] = 741.82[kN]$$

$$R_B = 0.85 * 1483.64 [kN] = 1261.1[kN]$$

$$R_C = 0.5 * 1483.64 [kN] = 741.82[kN]$$

El Buje que debe resistir la mayor fuerza es el buje intermedio pues en proporción con los otros dos es de 1.7 Veces la fuerza de los demás bujes.

$$\frac{0.85 * 1}{0.5} = 1.7 \text{ veces}$$

Por último, procedemos a calcular la presión que debe soportar el buje intermedio que se va a instalar así,

$$P_B = \frac{R}{d * l} [MPa] \quad (7)$$

Donde,

$$R = \text{Fuerza de Reacción del buje intermedio} = 1261.1[kN]$$

$$d = \text{Diámetro de Eje} = 146.05 [mm]$$

$$l = \text{Largo del buje} = 254[mm]$$

$$P_B = \frac{1261.1[kN]}{146.05[mm] * 254[mm]} = 33.99 \left[\frac{N}{mm^2} \right] = 33.99[MPa]$$

Al momento de realizar la compra de los bujes se debe garantizar que la presión de diseño de estos sea mayor a 33.99 [MPa] la calculada teóricamente. Adicionalmente y por motivos ambientales estos no deben llevar grasera de lubricación.

4.1.3 Construcción del Árbol Lógico

La siguiente etapa en el desarrollo de la metodología ACR es la construcción de un Árbol Lógico la cual se explicó en el capítulo 2 de este libro.

Con la información recolectada y analizada por el equipo de trabajo, se procede a definir el nombre correspondiente a la falla a analizar para este caso Fuga de Agua por el Muñón Intermedio de la Turbina y se plantea buscar los modos de Falla. Para encontrar los modos de Falla se debe realizar la siguiente pregunta ¿Cómo puede ser que exista caso Fuga de Agua por el Muñón Intermedio? Y se definen de las respuestas los modos de falla. Se presenta un resumen en la Tabla 4-1

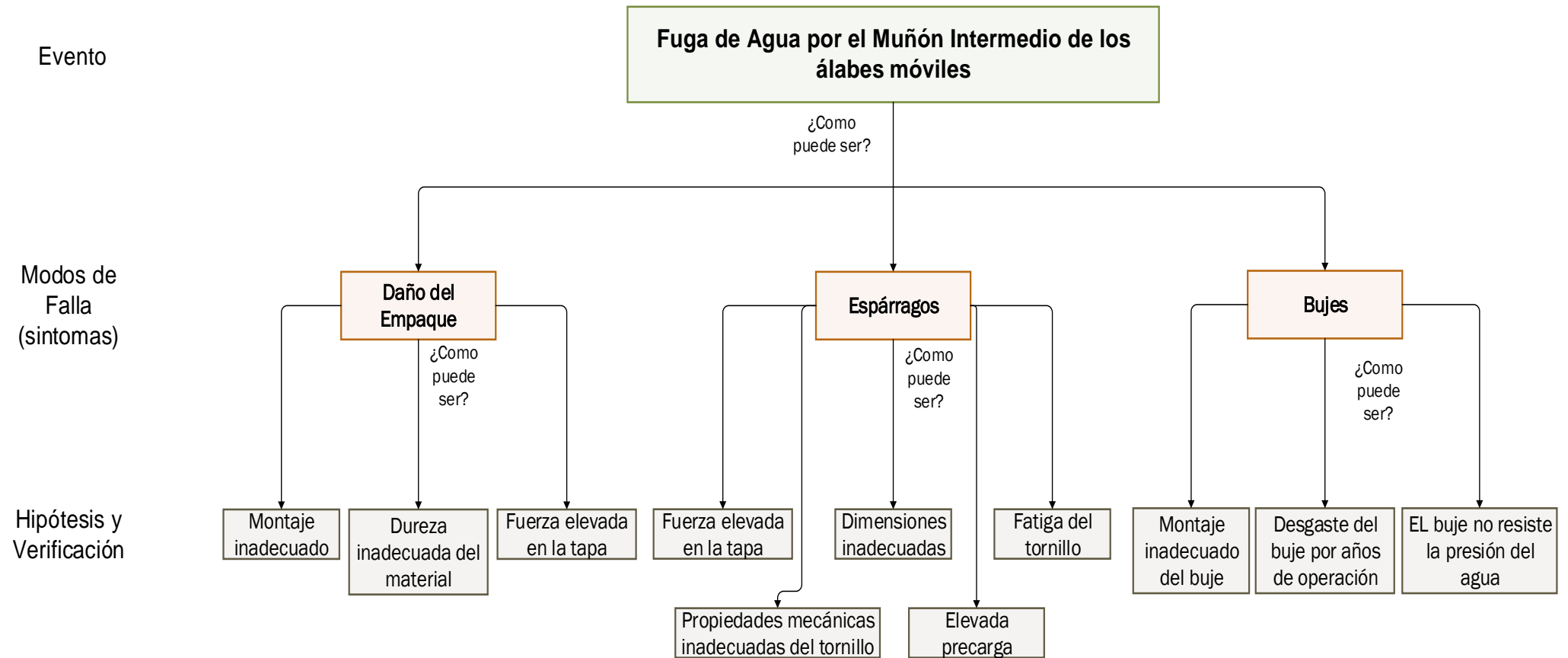
Tabla 4-1 Modos de Falla

EVENTO	Fuga de Agua por el Muñón Intermedio de la Turbina
MODO DE FALLA 1	Daño del Empaque
MODO DE FALLA 2	Daño de los Esparragos
MODO DE FALLA 3	Daño del Buje

Establecidos los modos de falla el siguiente paso es establecer las hipótesis y verificarlas. Para encontrar las hipótesis el equipo de trabajo debe plantearse la pregunta para cada modo de falla ¿Cómo puede ser que se dañe el empaque? Esta pregunta la responde el equipo de trabajo y posteriormente se reúnen a discutir cada una de las hipótesis y a verificarlas.

En la Figura 4-5 se presenta el árbol lógico desarrollado a partir del cual se empiezan a verificar las hipótesis.

Figura 4-5 Árbol Lógico General Inicial



EVENTO	Fuga de Agua por el Muñón Intermedio de los álabes móviles
MODO DE FALLA 1	Daño del Empaque
HIPOTESIS 1	Montaje inadecuado del empaque
HIPOTESIS 2	Dureza inadecuada del material de empaque
HIPOTESIS 3	Fuerza elevada en la tapa

- Verificación de las Hipótesis

Hipótesis 1: Montaje inadecuado del empaque.

El procedimiento para el montaje de los empaques se explicó en capítulo 3 de este documento y según las revisiones del personal encargado se ejecuta bien. Adicionalmente se están implementando unas mejoras como que el corte de los empaques debe quedar a 120° uno con respecto al otro y adicionalmente se encontró que el pegante utilizado loctite 495 no es apropiado para caucho porque causa cristalización del empaque, se debe utilizar pegante para caucho loctite 410.

Solución: Pegar los empaques con Loctite 410 y dejar los cortes de cada empaque a 120°.

Hipótesis 2: Dureza inadecuada del material de empaque.

En algunos de los casos se observa el empaque partido.

Figura 4-6 Empaques dañados grupo de generación 3.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicayá

Solución: Realizar pruebas de verificación de dureza aleatoria a los nuevos pedidos de empaques.

Hipótesis 3: Fuerza elevada en la tapa.

En funcionamiento normal el empaque no debería sufrir elevada fuerza en la tapa pues es el buje el que soporta esta fuerza. Si hay desgaste de los bujes es probable entonces la fuerza se transfiere a la tapa y ocasiona el daño del empaque.

Solución: Realizar cambio de los bujes.

EVENTO	Fuga de Agua por el Muñón Intermedio de los álabes móviles
MODO DE FALLA 2	Daño de los Espárragos
HIPOTESIS 1	Fuerza elevada en la tapa
HIPOTESIS 2	Propiedades mecánicas inadecuadas del tornillo
HIPOTESIS 3	Dimensiones inadecuadas (fabricación)
HIPOTESIS 4	Elevada precarga (torsión)
HIPOTESIS 5	Fatiga del tornillo (tiempo de operación)

- Verificación de las Hipótesis

Hipótesis 1: Fuerza elevada en la tapa.

En funcionamiento normal los espárragos no deberían sufrir elevada fuerza en la tapa pues es el buje el que soporta esta fuerza. Si hay desgaste de los bujes es probable entonces que la fuerza se transfiera a la tapa y ocasione daño del empaque. A consecuencia del daño de estos dos elementos se empiezan a presentar vibraciones en el eje del álabe estas aumentan la fuerza axial de la tapa y por lo tanto disminuyen la vida útil del espárrago.

Los espárragos se sometieron a un estudio en el laboratorio “Tornillos Univalle” sobre los espárragos y emitieron el siguiente concepto.

“Se encontró sobre los tornillos: una amplia zona de marcas de playa, característica de una zona de propagación de fisuras por fatiga y una pequeña zona de fractura final. La amplia zona de propagación indica una condición de bajo esfuerzo (o alto ciclaje) lo que quiere decir que los esfuerzos son relativamente bajos, pero suficientes para producir fatiga. Ya que la condición de falla corresponde a fatiga de bajo esfuerzo, se recomienda solucionar este problema aumentando la resistencia de los pernos.”

Solución: Para esto se recomienda utilizar pernos grado 8 con buen acabado superficial en las roscas.

Hipótesis 2: Propiedades mecánicas inadecuadas del tornillo.

En la unidad de generación 1 se instalaron espárragos SAE 4140 galvanizados en frío en el mes de marzo de 2015, los cuales presentaron fallas muy pronto y esto generó inundación del buje. Por esta razón se decidió realizar una prueba de torsión para estos espárragos los cuales fallaron a 40 Libras por pie y se deciden cambiar por espárragos por tipo petrolero grado B7 con una torsión comprobada de 190 Libras por pie.

Sin embargo, después del análisis realizado en el laboratorio de Tornillos Univalle se concluye que según su composición química los espárragos adecuados son, el SAE/AISI 420 o del tipo petrolero zincromatizados, además recomiendan el aumento de longitud de 2 ½" a 3" y realizar pruebas aleatorias a los espárragos comprados.

Figura 4-7. Análisis químico de esparrago.

Ref: Informe EPSA 27-15 ANALISIS QUIMICO ESPARRAGO

El siguiente es el resultado del Análisis Químico realizado a la muestra de Esparrago. Así:

Porcentaje %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V
0,25	0,40	0,44	0,025	0,006	14,19	0,26	0,09	0,13	0,007	0,03

NOTA: Resultados de Análisis Químico obtenidos via Espectométrica.
El resultado corresponde única y exclusivamente a la muestra suministrada por EPSA.

Este material pude clasificarse como un ACERO INOXIDABLE - SAE/AISI 420, Cuya composición seria:

Porcentaje %					
C	Si	Mn	P	S	Cr
Min	Max	Max	Max	Max	
0,15	1,0	1,0	0,04	0,04	12,0 / 14,0

Cualquier consulta adicional del presente informe, estamos para atenderla.

Cordialmente:

Univalle

Fuente: Estudio de los espárragos en el laboratorio Tornillos Univalle. Suministrado por el ingeniero mecánico del Alto Anchicayá.

En la Figura 4-7 se muestra un esparrago de la unidad de generación 3 completamente oxidado porque su composición química no era la adecuada.

Figura 4-8 Esparrago oxidado grupo generación 3.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicayá

Solución: Utilizar tornillos Inoxidable AISI 420 o tipo petroleros zincromatizados aumentando longitud de 2 ¼ a 3 (pulgadas), realizar pruebas de torsión aleatoria a los nuevos tornillos adquiridos.

Hipótesis 3: Dimensiones inadecuadas (fabricación).

Esta hipótesis se descarta porque se tienen planos del fabricante de la turbina donde especifica el diámetro de los tornillos. Adicionalmente, se mide este diámetro con calibrador y se comprueba.

Hipótesis 4: Elevada precarga (torsión).

EL torque de precarga según especificaciones de la turbina debe ser de 60 libas por pie. Actualmente no se mide el torque aplicado para cada esparrago. El equipo descarta esta hipótesis pues todos los tornillos se apretan hasta el mismo punto y no todos fallan,

Solución: Aplicar precarga con torquimetro hasta 60 Libras por pie.

Hipótesis 5: Fatiga del tornillo (tiempo de operación).

La fatiga de los tornillos se presenta por que la carga a la que está sometido es mayor a su pretorsión o por las variaciones de carga. Se ha podido establecer que diferentes tipos de tornillos ubicados en los alabes donde se presenta las fallas constantemente se dañan con pocas horas de operación sin importar su pretorsión. Se descarta que sea el material del tornillo.

EVENTO	Fuga de Agua por el Muñón Intermedio de los álabes móviles
MODO DE FALLA 3	Daño del Buje
HIPOTESIS 1	Montaje inadecuado del buje
HIPOTESIS 2	Desgaste del buje por años de operación (Vida Útil)
HIPOTESIS 3	El buje no resiste la presión del agua

- Verificación de las Hipótesis

Hipótesis 1: Montaje inadecuado del buje.

El procedimiento para el montaje de los bujes se explicó en capítulo 3 de este documento y depende de la marca del buje. El personal a cargo de esta tarea lo ejecuta bien según las revisiones técnicas. Sin embargo, el espacio para montar estos bujes de demasiado estrecho e incómodo.

Solución: Mejorar el espacio de montaje de los bujes e implementar iluminación en la zona a intervenir en el momento del montaje.

Hipótesis 2: Desgaste del buje por años de operación (Vida Útil).

Analizando la información recopilada y los datos históricos de fallas por fuga de agua se puede observar en la Figura .3-19 que es una relación directamente proporcional, a mayor cantidad de años de operación mayor es la cantidad de Fallas por fuga de agua en el muñón intermedio.

Solución: Cambiar bujes con una mayor frecuencia.

Hipótesis 3: El buje no resiste la presión del agua.

Esta hipótesis fue descartada porque se calculó la presión del agua sobre los bujes y la presión de los servomotores y los fabricantes de los bujes garantizan que los estos resisten más de la fuerza generada estas dos presiones.

4.1.4 Identificar causas raíces: Físicas, Humanas y Latentes

Una vez terminadas de verificar las hipótesis de falla se procede a identificar las causas raíces del problema de fuga de agua.

La Causa Raíz Física del problema es la Hipótesis 2: Desgaste del buje por años de operación (Vida Útil), pues los bujes están sometidos a la presión que ejerce el agua, la presión de los servomotores y los ciclos de apertura y cierre, condiciones que hacen que este deba ser cambiado con una mayor frecuencia.

Se encontró en una de las unidades evidencia en algunos alabes de desgarramiento del material del buje lo cual confirma que la causa raíz física es debido al desgaste del material.

Por último se debe garantizar que la presión de diseño de los nuevos bujes a comprar debe ser de mínimo 33MPa y por recomendaciones ambientales deben ser autolubricados por agua y no por grasa.

La Causa Raíz Humana del problema es la Hipótesis 1 Montaje inadecuado del buje esta se puede corregir implementando mejoras en la iluminación y climatización en el momento de hacer los cambios de los bujes y realizando pausas activas de seguridad industrial para descansar los músculos de la espalda.

Figura 4-9 Montaje de bujes 6 y 9 grupo generador 3.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicayá

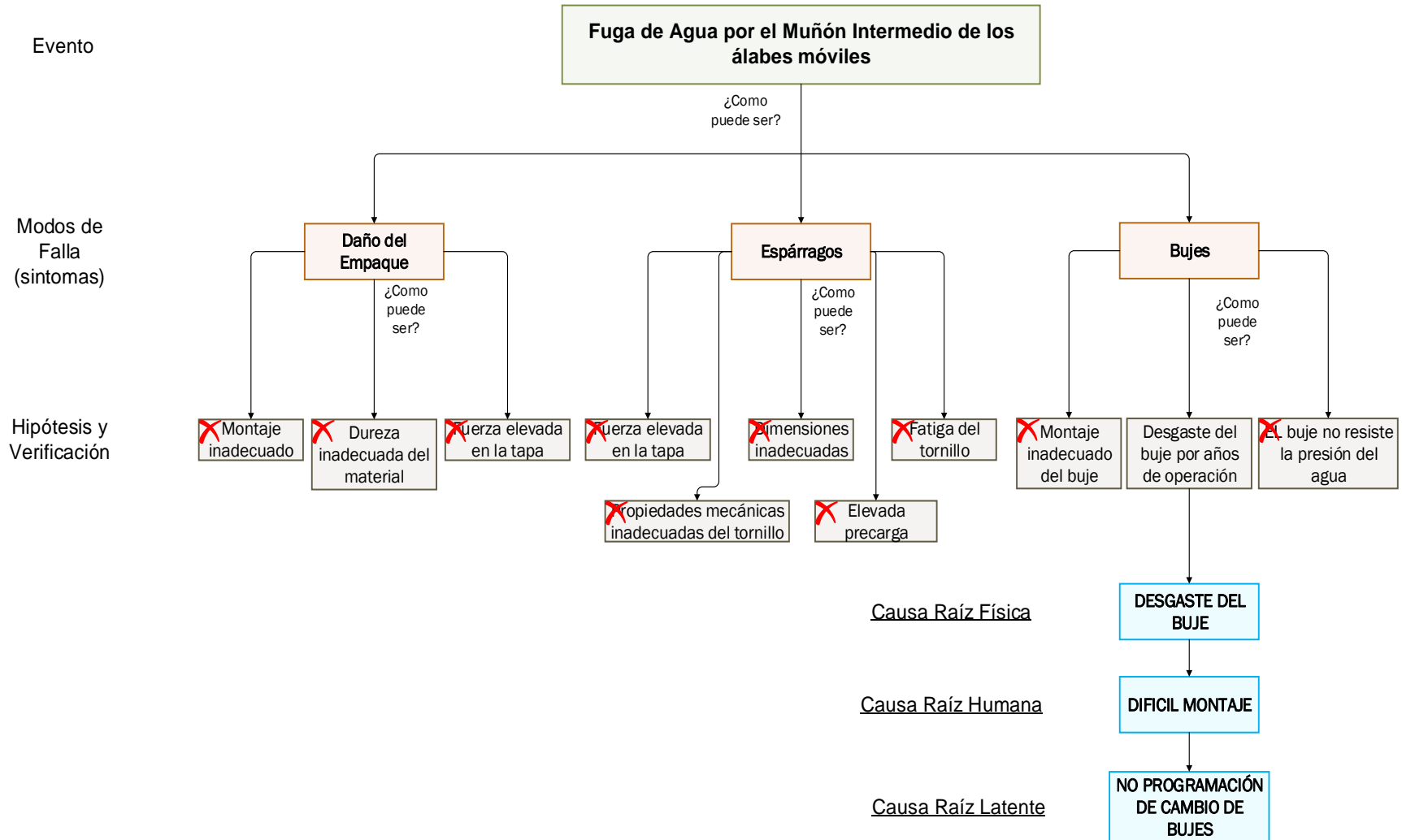
Figura 4-10 Montaje de bujes 6 y 9 grupo generador 3.



Fuente: Suministrada por el operario mecánico del Alto de Anchicayá

La Causa Raíz Latente del problema es la NO programación de los cambios de los bujes con una mayor frecuencia. Se entiende que para realizar cambio de los bujes se necesitan 120 días calendario y que esto afecta fuertemente los ingresos de la compañía, pero se están incurriendo en un riesgo de posible inundación de la central. Se recomienda evaluar la frecuencia de cambio de bujes y realizar una evaluación financiera para definir política.

Figura 4-11 Árbol Lógico General Final



Árbol Lógico Desarrollado

4.1.5 Determinación de medidas correctivas y preventivas

Para terminar el análisis causa raíz el equipo debe establecer un plan de acción buscando dar solución a cada una de las causas raíces del problema, esto con el objetivo que este tipo de Falla no vuelva a presentarse en la central. Además, se debe compartir esta información para no tener esta falla en otras centrales de generación. Para cada una de las causas raíces se ha propuesto una recomendación.

Para la causa raíz física que es el desgaste de los bujes por el tiempo de operación se propone que los encargados de la compra de estos bujes verifiquen el cálculo teórico de presión que deben soportar estos bujes para garantizar que los comprados cumplan con esta especificación.

Para la causa raíz humana que es montaje inadecuado del buje se propone mejorar las condiciones del espacio de trabajo para realizar este montaje como la iluminación del espacio y la climatización del mismo, adicionalmente se propone que el personal de montaje realice pausas activas durante el proceso.

Para la causa raíz latente que es la NO programación del cambio de los bujes se propone a la gerencia realizar una evaluación financiera para así determinar una política de cambio para todas las centrales y así evitar el riesgo de inundación de la unidad.

Dentro de seis meses se debe verificar la eficacia de las acciones planteadas por el equipo de trabajo, presentando evidencia que las recomendaciones del plan de acción fueron todas implementadas en la central o están próximas a implementarse.

CAPITULO 5 IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACR

En este capítulo se implementará el análisis de falla causa raíz desarrollado en el capítulo anterior en la herramienta computacional *PROACT SUITE V 4*, la cual permite organizar la información, estandarizar los análisis en la compañía y obtener los reportes de falla.

5.1 SOFTWARE DE ANÁLISIS

El software seleccionado para implementar la metodología es *PROACT SUITE V 4* este fue seleccionado porque realiza Análisis Causa Raíz usando la metodología PROACT, el cual como se mencionó en el Capítulo 1 es el más conveniente para el análisis de fallas en centrales hidroeléctricas. Este software fue creado por la empresa norteamericana *RELIABILITY CENTER INC.* y la licencia de funcionamiento fue adquirida por EPSA ESP.

RELIABILITY CENTER INC es una compañía dedicada al estudio de confiabilidad en las empresas a través de servicios de análisis e informes y capacitaciones. La metodología utilizada por esta compañía es el Análisis Causa Raíz PROACT y por medio de la aplicación de esta metodología se encuentran las raíces físicas, humanas y latentes de los problemas de las compañías. EPSA es una de las empresas capacitadas por esta compañía y hace uso del software diseñado por ellos.

5.2 DESARROLLO DEL ANÁLISIS EN EL SOFTWARE.

Los requerimientos de sistema para la instalación del software son:

- **REQUERIMIENTOS DE HARDWARE:**
 - Intel Pentium o similar de 1 GHz o más.
 - Memoria RAM de mínimo 1 GB.
 - Display 1024 x 768 high Color, 32 bit.
 - Espacio requerido en el disco duro de 100 MB.
- **REQUERIMIENTO DE SOFTWARE:**
 - Windows 7 o superior.
 - Microsoft Office 2013 o superior instalado en inglés.
- **REQUERIMIENTOS ADICIONALES PARA LA EDICIÓN EMPRESARIAL.**
 - Sistema SQL Server 2012 o superior.
 - Oracle 9i o superior.

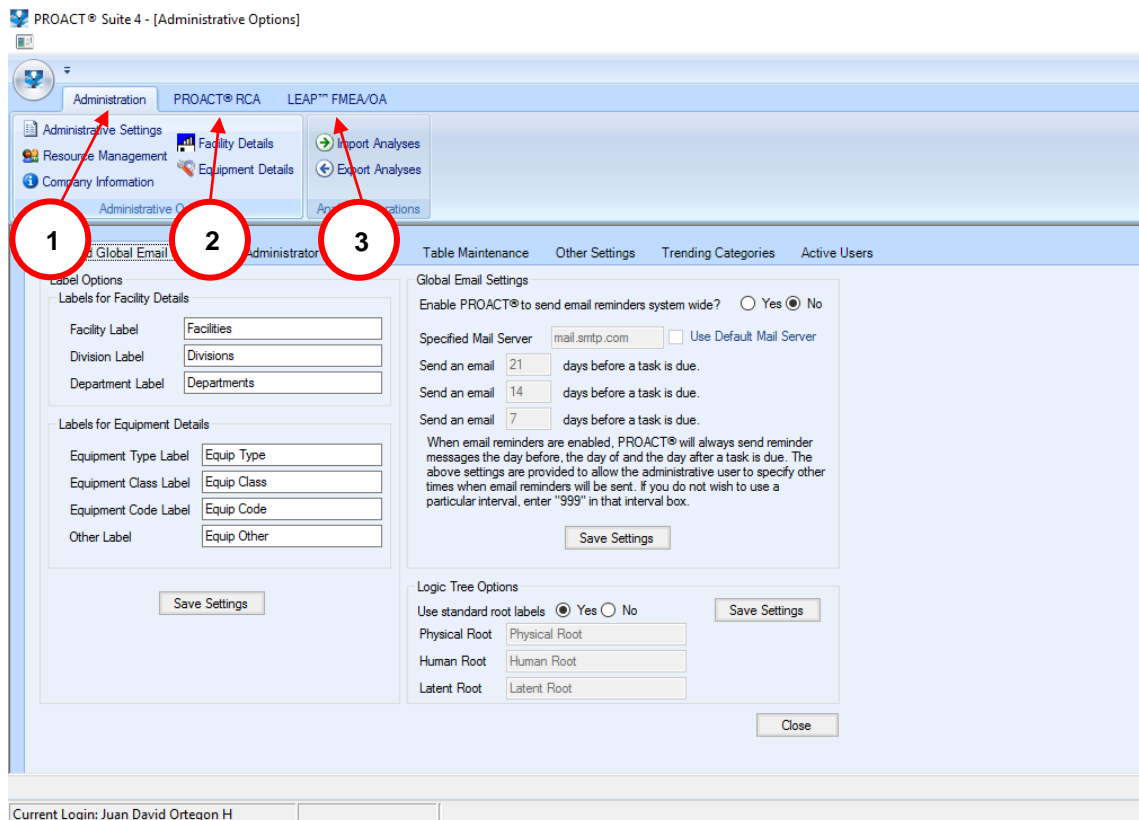
5.2.1 Ajustes administrativos del Software

La primera pantalla al abrir el software es la Figura 5-1 en esta se evidencian 3 pestañas:

1. *Administration*. En esta pestaña se modifican las opciones administrativas del análisis.

2. *PROACT RCA*. En esta pestaña se desarrolla el análisis causa raíz con metodología PROACT.
3. *LEAP FMEA/OA*. En esta pestaña se desarrolla el análisis de nivel de riesgo que presentan las fallas con metodología FMEA. En este documento no se explicó este tipo de análisis.

Figura 5-1 Pantalla inicial. *PROACT*.

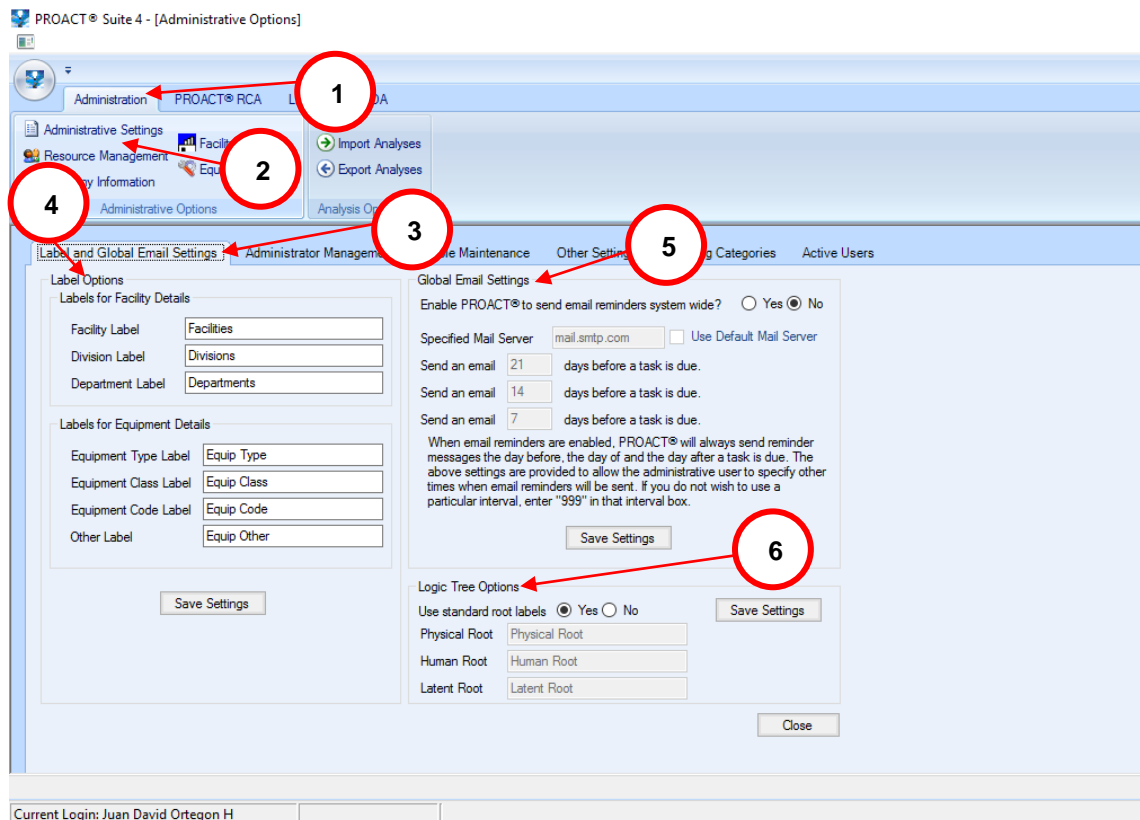


El siguiente paso es la Figura 5-2 y permite revisar los ajustes administrativos como las etiquetas y ajustes de envío de emails, pues este software tiene la posibilidad de conectarse y enviar correos electrónicos automáticos al equipo de trabajo de ACR. El proceso para modificación de estos ajustes es:

1. *Administration*. En esta pestaña se modifican las opciones administrativas del análisis.
2. *Administrative Settings*. En este botón se ingresarán los ajustes administrativos.
3. *Label and Global Email Settings*. En esta pestaña se ingresa al menú para modificar los ajustes administrativos de etiquetas y envío de emails.
4. *Label Options*. En este espacio se modifican las opciones de etiquetas o nombres que se utilizarán el software.

5. *Global Email Settings*. En este espacio se deben ajustar las especificaciones de envío de emails. Decidir si el programa enviará emails automáticos de recordatorios de reunión y cuantos días antes.
6. *Logic Tree Options*. Aquí se pueden modificar las etiquetas del árbol lógico a realizar.

Figura 5-2 Definición características administrativas. *PROACT*



EL botón siguiente corresponde a la gestión de recursos “Resource Management”, en esta opción se deben llenar los datos de los participantes en el equipo de trabajo que realizarán el análisis causa raíz. La Figura 5-3 muestra la pantalla que debe ser llenada para cada miembro del equipo y el significado de cada espacio.

1. *Resource Management*. Boton para activar la gestión de recursos.
2. *Resorce Form*. Es la pestaña donde se encuentra el formulario de recursos.
3. Área de ingreso de datos de cada uno de los miembros del equipo.
4. *Add*. Añadir permite crear un nuevo miembro del equipo de trabajo.
5. *Save*. Guarda los cambios en el formulario de los datos del miembro del equipo de trabajo.

6. *Administrative Information*. En este espacio se permite ingresar el pago mensual del nuevo miembro del equipo con el objetivo de llevar un control del costo del análisis.
7. *User Group Membership*. Permite crear grupos de miembros específicos.

Figura 5-3 Definición de participantes en el equipo de trabajo. *PROACT*.

PROACT® Suite 4 - [Resource Management]

Administration PROACT® PCA LEAP™ FIVEVOA

Administrative Settings Facility Details Equipment Details Resources Import Analyses Export Analyses

Resource Management Company Information Administrative Options Resource Management Analysis Operations

Resource Form Resource Grid Filter Resources User Options

Resource ID Number 1

Resource Name (First, Last) Juan David Ortegón H

Title Ing. Electricista

Company Univalle

Site Default

Address 1 Univalle

Address 2

City Cali

State, Zip/Postal Code 57 2

Telephone Number 3063723

Mobile Number 3114407247

Fax Number

Email Address juan.ortegon@correounivalle.edu.co

Windows User ID prestamo

Notes Estudiante de Maestría en ingeniería eléctrica

Administrative Information

Pay Rate 0.0000 Per

Budget Code

Allow user to create new analyses

Grant Site Administrative status

Grant Global Administrative status

User Group Membership

Available Groups

ACR FUGA AGUA ANCHICAY

Assigned Groups

ACR FUGA AGUA ANCHICAY

Add >>

<< Remove

Manage Groups

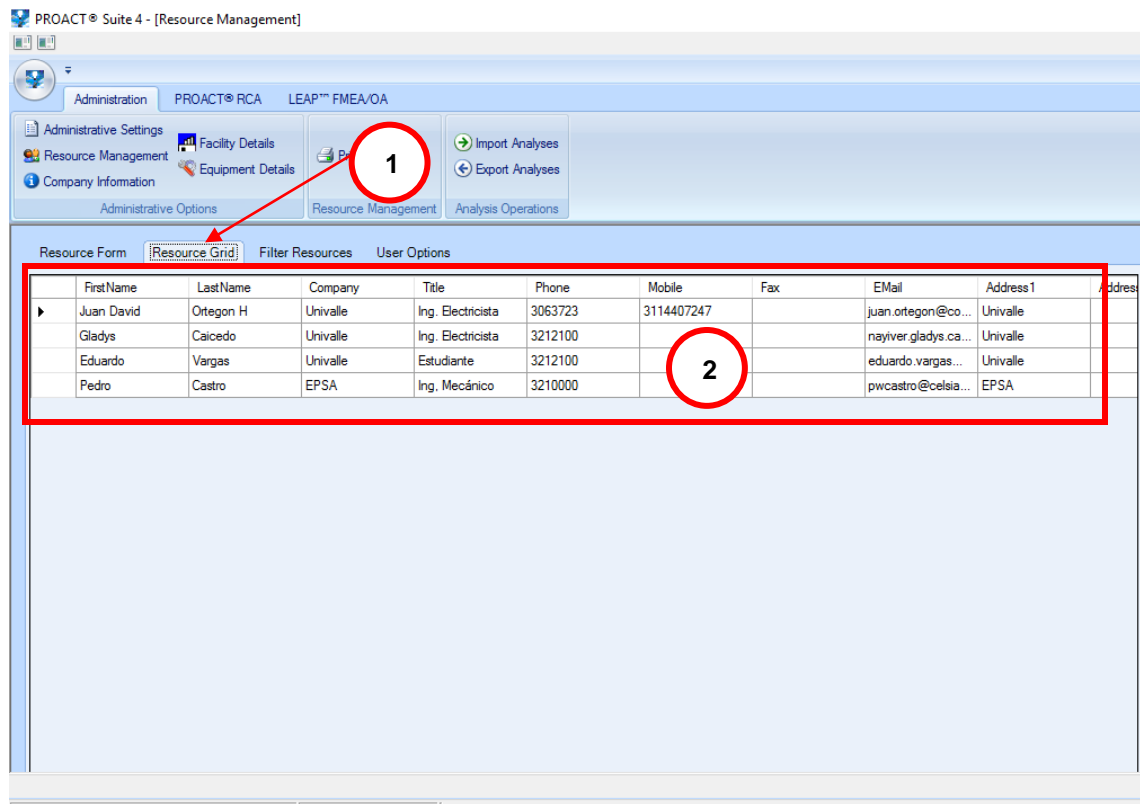
Add Edit Save Cancel Delete

Record 1 of 4

En la gestión de recursos tenemos una segunda pestaña que permite ver en una Tabla el resumen de los miembros del equipo de trabajo ver Figura 5-4.

1. *Resource Grid*. Es la pestaña que permite ver una tabla con todos los miembros del análisis que han sido añadidos.
2. Es el espacio de visualización donde se puede verificar los miembros del equipo de trabajo que realizará el análisis y sus datos personales.

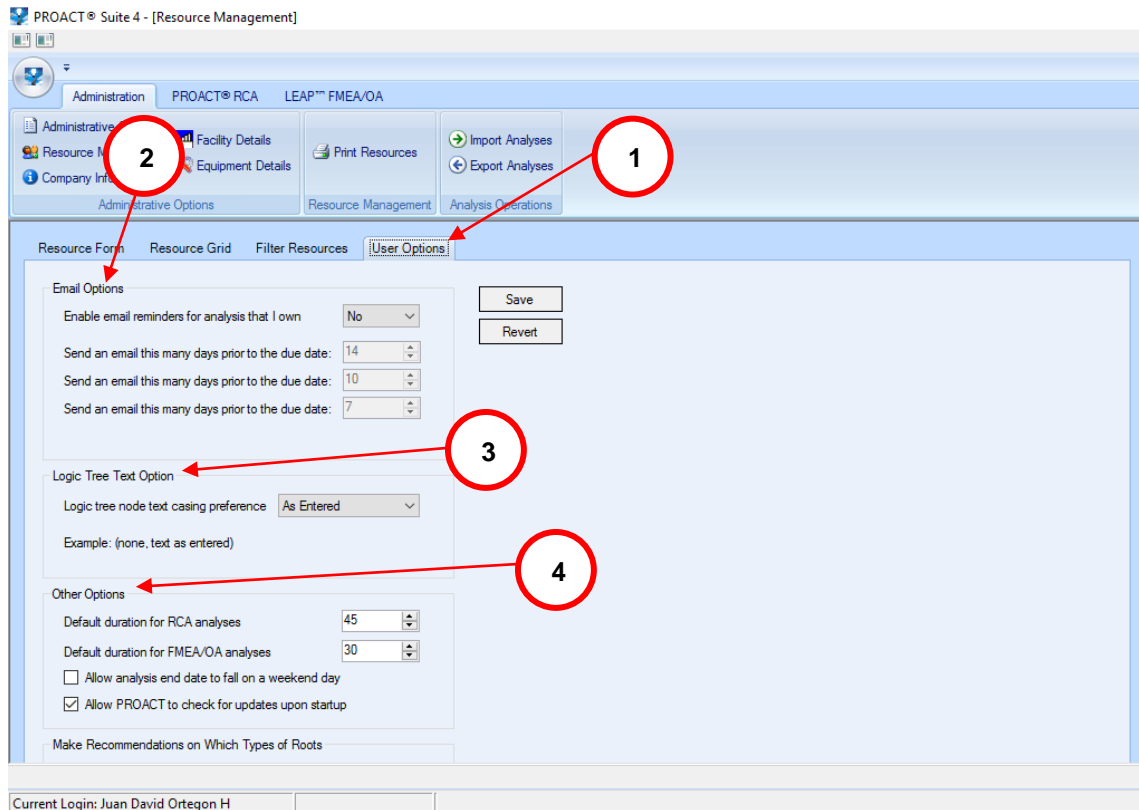
Figura 5-4 Resumen de participantes en el equipo de trabajo. *PROACT*



La Figura 5-5 muestra las opciones de usuario y se definen para los nuevos miembros del equipo opciones de envío de emails, opciones de texto dentro del árbol lógico y duración del análisis.

1. *User Options*. Pestaña para modificación de opciones de usuario.
2. *Email Options*. Define las opciones de envío de email para los miembros del equipo de trabajo.
3. *Logic Tree Text Options*. Permite definir las opciones de texto en el árbol lógico.
4. *Other Options*. En este espacio se define la duración del análisis.

Figura 5-5 Pantalla Opciones de usuario. *PROACT*

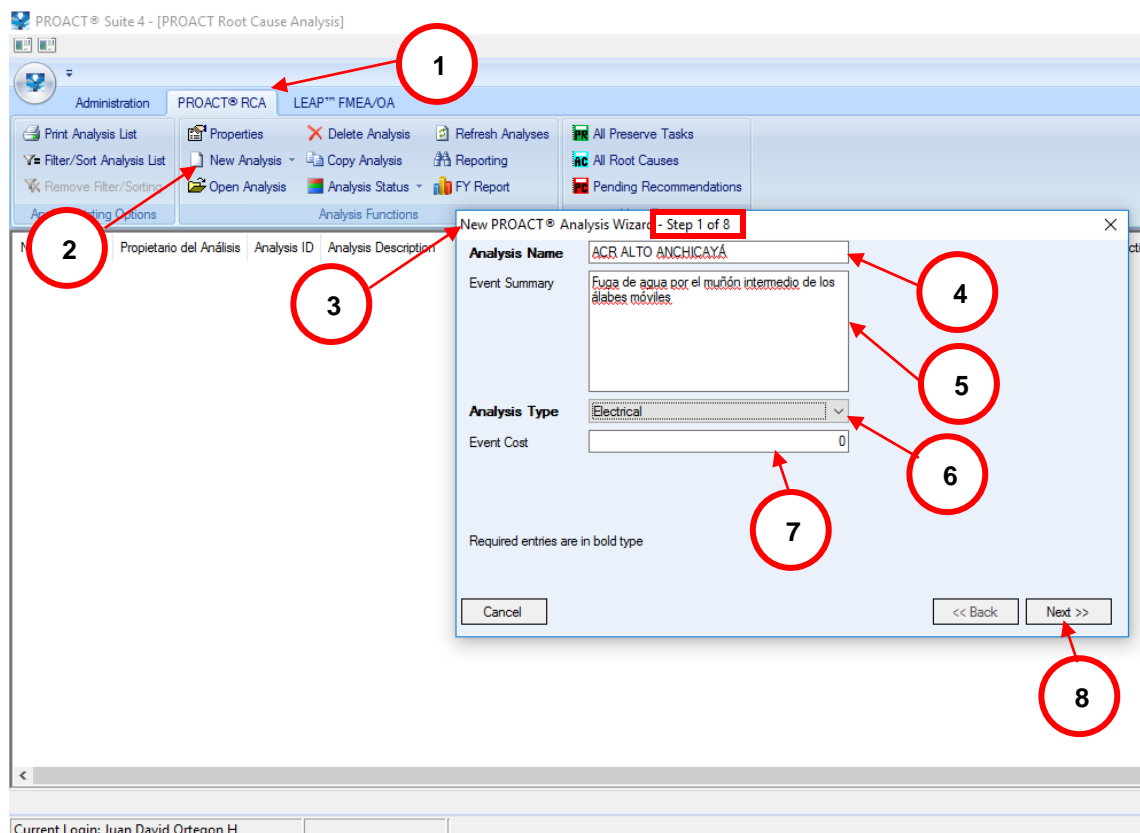


5.2.2 Creación del caso de análisis.

La siguiente etapa es crear el nuevo análisis causa raíz a continuación se presenta el proceso para crearlo y en la Figura 5-5 identifica cada botón para ejecutarlo.

1. *PROACT RCA*. Pestaña para acceder a las opciones del análisis RCA como crear el nuevo análisis.
2. *New Analysis*. Botón para crear el nuevo análisis.
3. *New PROACT Analysis Wizard – Step 1 of 8*. Ventana emergente para la creación del nuevo análisis. Paso 1 de 8.
4. *Analysis Name*. Espacio para asignar nombre al análisis.
5. *Event Summary*. Escribir un resumen del evento a analizar.
6. *Analysis Type*. Es una lista desplegable que permite clasificar el análisis en alguna de las categorías.
7. *Event Cost*. Casilla que permite ingresar el costo que ha ocasionado el evento a analizar.
8. *Next*. Para pasar al siguiente paso.

Figura 5-6 Paso 1 para la creación de un nuevo ACR. PROACT



Los pasos 2 y 3 corresponden a la definición de estrategias, divisiones o departamentos dentro del análisis, para nuestro caso no aplican.

La Figura 5-7 presenta el paso 4 donde se asignan los factores críticos de éxito, los seleccionamos todos pues en nuestro caso todos aplican:

1. *Assign Critical Success Factors*. Paso 4 de 8 asignar los factores críticos de éxito.
2. Los criterios son:
 - Una persona externa y/o experto externo participará en el análisis.
 - Se utilizará un enfoque disciplinado de RCA.
 - Se utilizará un proceso de medición para seguir el progreso de las recomendaciones aprobadas. (Seguimiento plan de acción).
 - Todas las hipótesis de análisis serán verificadas o descartadas.
 - La gerencia acepta evaluar con justicia los hallazgos y recomendaciones del equipo de análisis.
 - Nadie será disciplinado por errores honestos.

Figura 5-7 Paso 4 para la creación de un nuevo ACR. *PROACT*

New PROACT® Analysis Wizard - Step 4 of 8

Assign Critical Success Factors

- ☒ A cross-functional section Of personnel/experts will participate In the analysis
- ☒ A disciplined RCA approach will be utilized
- ☒ A measurement process will be used to track the progress Of approved recommendations
- ☒ All analysis hypotheses will be verified Or disproven
- ☒ Management agrees to fairly evaluate the analysis team's findings and recommendations
- ☒ No one will be disciplined for honest mistakes

Custom CSF

En el paso 5 se crea el acta del equipo como la Figura 5-8.

1. *Team Charter*. Acta del equipo. Se invita al nuevo equipo de investigación a encontrar deficiencias en los sistemas de gestión y a comunicar a la gerencia las recomendaciones correctivas del análisis que se deben seguir de manera rápida.
2. *Analysis Comments*. Espacio para adicionar comentarios del análisis.

Figura 5-8 Paso 5 para la creación de un nuevo ACR. *PROACT*

New PROACT® Analysis Wizard - Step 5 of 8

Team Charter Use Default

To identify the root causes of the **ACR ALTO ANCHICAYA**. This includes identifying deficiencies in or lack of management systems. Appropriate recommendations for root causes will be communicated to management for rapid resolution.

☐ Save this charter as my default charter

Analysis Comments

Analisis realizado por estudiantes de la universidad del valle en conjunto con EPSA

Required entries are in bold type

Cancel << Back Next >>

En la Figura 5-9 se presentan el paso 6 que permite asignar los miembros del equipo en este análisis.

1. *Available Resources*. Recursos disponibles, aquí se encuentra un listado con los nombres de las personas que pueden ser elegidas para conformar el equipo de trabajo.
2. *Assigned Resources*. Recursos asignados, este es el listado de los miembros del equipo de trabajo.
3. *Default Team Member Permission*. Aquí se debe elegir los permisos que tendrá cada miembro del equipo en el análisis, Leer o Escribir o ambas.

Figura 5-9 Paso 6 para la creación de un nuevo ACR. *PROACT*

New PROACT® Analysis Wizard - Step 6 of 8

Available Resources (double-click to assign)

FirstName	LastName	Company	Title
Gladys	Caicedo	Univalle	Ing. B
Pedro	Castro	EPSA	Ing. I
Eduardo	Vargas	Univalle	Estud
*			

Assigned Resources

Resource Name

Gladys Caicedo

Pedro Castro

Juan David Ortegon H

Eduardo Vargas

Default Team Member Permission: Read/Write

Buttons: Cancel, << Back, Next >>, View Groups

En el paso 7 se deben indicar 3 fechas importantes de ubicación temporal.

1. *Date Event Occurred*. Ingresar Fecha en que ocurrió el evento. Para nosotros no es relevante esta fecha pues la falla es constante.
2. *Actual Analysis Start Date*. Ingresar Fecha en que se inicia el análisis, por defecto es la fecha actual.
3. *Analysis Estimated Completion*. Día estimado para finalización del análisis. Esta fecha la calcula según los ajustes administrativos donde se especificó que los análisis RCA tenían una duración de 45 días.

Figura 5-10 Paso 7 para la creación de un nuevo ACR. *PROACT*

New PROACT® Analysis Wizard - Step 7 of 8

Date Event Occurred 1
martes , 30 de mayo de 2017

Actual Analysis Start Date 2
martes , 30 de mayo de 2017

Analysis Estimated Completion 3
viernes , 14 de julio de 2017

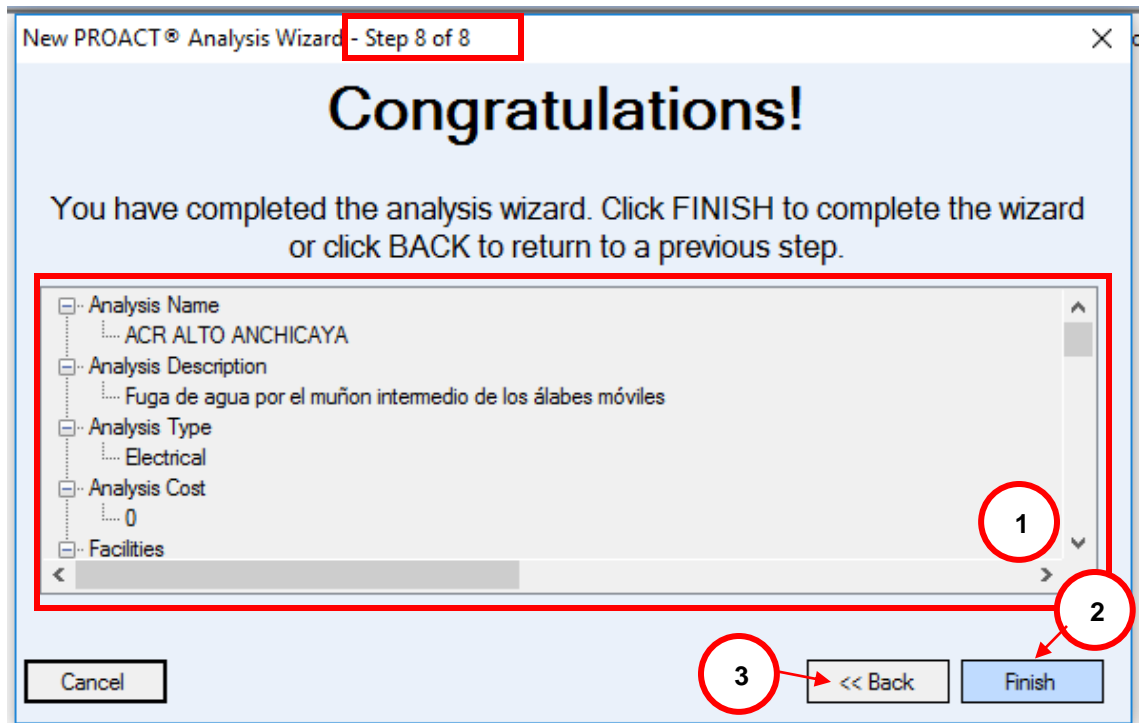
Required entries are in bold type

Cancel << Back Next >>

El último paso para finalizar la creación del análisis corresponde a la Figura 5-11 y presentan un resumen de todos los pasos anteriores.

1. Espacio resumen donde se muestran todos los datos del análisis que fueron ingresados en los pasos del 1 al 7.
2. *Finish*. Botón para Finalizar. Si verificados los pasos están bien se procede a finalizar el análisis.
3. *Back*. Botón para atrás. Si se desea cambiar algún dato del análisis debemos devolvemos hasta el paso donde está este.

Figura 5-11 Paso 8 para la creación de un nuevo ACR. *PROACT*

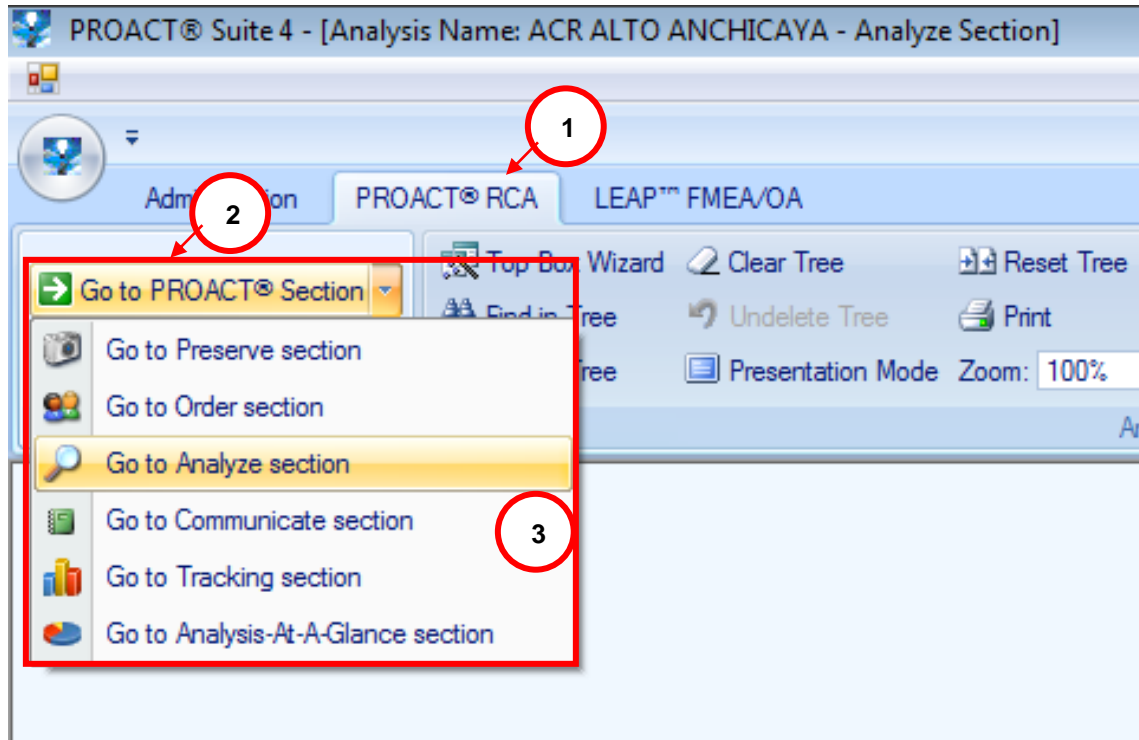


Finalizado el análisis tenemos la pantalla de la Figura 5-12 y para seguir es necesario entender que estamos en la pestaña *PROACT RCA* y que en esta encontramos diferentes secciones de la lista desplegable.

1. *PROACT RCA*. Pestaña para acceder a las opciones del análisis RCA como crear el nuevo análisis.
2. *Go to PROACT Section*. Botón que despliega la lista de secciones del análisis de RCA.
3. Lista de secciones que se pueden trabajar para cada análisis de causa raíz. Las principales secciones son:
 - *Go to Preserve Section*. Sección que permite almacenar información acerca de evidencias o fotos que se tengan del análisis.
 - *Go to Order Section*. Sección de orden en la cual se permite modificar las características del análisis definidas en el momento de la creación del mismo.
 - *Go to Analyse Section*. Sección de análisis donde se realiza la construcción del árbol lógico con sus modos de falla, hipótesis, Causas Raíces del evento y recomendaciones.
 - *Go to Communicate Section*. Sección de comunicación que permite a los miembros del equipo hacer seguimiento a las recomendaciones y verificar que sean ejecutadas con evidencias adjuntas.

- *Go to Tracking Section.* Sección de seguimiento o rastreo en la cual se pueden crear gráficos que expliquen mejor a la gerencia como este análisis ayudó a la compañía, que costos se ahorraron al aplicar las recomendaciones del análisis.
- *Go to Analysis at a Glance Section.* Sección de ojeada de análisis en la cual se presenta un resumen del caso de análisis realizado.

Figura 5-12 Listado de secciones para la realización del análisis causa raíz.



La primera sección a revisar es la Sección de Preservar en esta se debe ingresar la información recopilada en el análisis esta se clasifica según la metodología de las 5P (Posición, Parte, Papel, Personas y Paradigmas). A continuación, en la Figura 5-13 se presenta el procedimiento para adicionar cada elemento de la información.

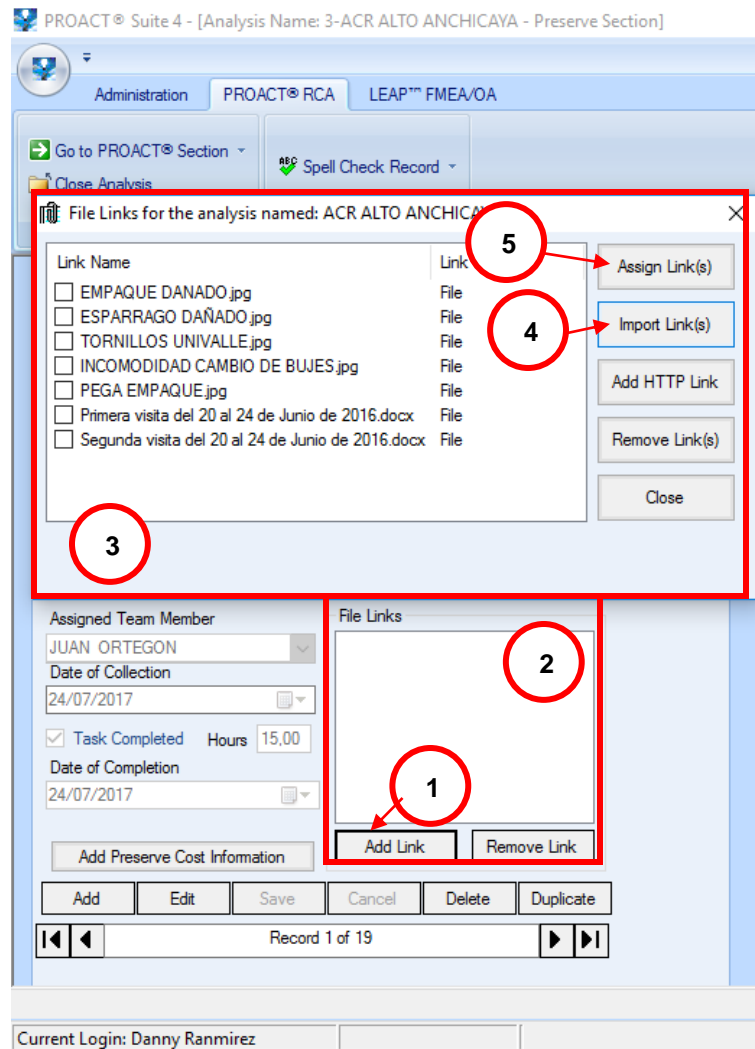
1. *Add.* Botón para Adicionar cada uno de los datos recolectados.
2. *Data Category.* La categoría del dato se debe seleccionar entre Posición, Parte, Papel, Personas y Paradigmas según la metodología de recolección.
3. *Data To Collect.* Se debe ingresar el nombre del dato a recolectar.
4. *Collection Strategy.* Estrategia de colección.
5. *Assigned Team Member.* Miembro del equipo asignado.
6. *Date of Collection.* Fecha de colección.
7. *Hours.* Horas de tiempo necesarias para colección.
8. *Save.* Guardar los cambios ingresados al sistema.

Figura 5-13 Pantalla “Go to Preserve Section”

Una vez guardados los cambios se puede asignar un link al Dato recopilado, por ejemplo, una foto o un documento que apoye la información. En la Figura 5-14 se presenta el procedimiento para adicionar los Links.

1. *Add Link*. Botón para Adicionar Link.
2. Espacio donde se verifican los Links relacionados con el dato recolectado.
3. Ventana emergente para importar y asignar el Link.
4. *Import Link*. Botón para cargar archivos desde el computador.
5. *Assign Link*. Botón para asignar el Link a ese dato recolectado.

Figura 5-14 Adicionar Links a cada dato recolectado.



En esta sección podemos revisar la información de varias maneras como lo muestra la Figura 5-15:

1. *Form View*. Vista de Formulario.
2. *Grid View*. Vista de cuadrícula.
3. *Task Costs*. Costo de la Tarea.
4. Espacio de la vista en forma de cuadrícula.

Figura 5-15 Vista en cuadrícula.

PROACT® Suite 4 - [Analysis Name: 3-ACR ALTO ANCHICAYA - Preserve Section]

Administration PROACT® RCA LEAP™ FMEA/OA

Go to PROACT® Section ▾

1 2 3

PROACT® Analysis Navigation Preserve Functions

Form View **Grid View** Task Costs

	Miembro Equipo	Categoría Datos	Datos a Recolectar
	JUAN ORTEGON	Paper	Diagramas de flujo o flujograma del
	PEDRO CASTRO	Paper	Planos eléctricos, mecánicos, civile
	JUAN ORTEGON	Paper	Manuales del fabricante de los equ
	EDUARDO VARGAS	Paper	Manuales de operación normal del
	JUAN ORTEGON	Paper	Registros históricos de las variables
	JUAN ORTEGON	Paper	Condiciones de operación antes de
	JUAN ORTEGON	Paper	Bitácora (papel y medio magnético)
	JUAN ORTEGON	Paper	Planes de mantenimiento y Ordene
	JUAN ORTEGON	Paradigms	Paradigmas en malos procesos o m
	JUAN ORTEGON	People	: El campo de personal relacionado
	JUAN ORTEGON	Position	FECHA: ABRIL 18 DE 2017
	JUAN ORTEGON	Position	SISTEMA EN FALLA: Distribuidor c
	JUAN ORTEGON	Parts	ELEMENTO EN FALLA: Buie inter

4

Filter Preserve Records

Filter Column Filter Operation Filter Value

Categoría Datos Comienza Con

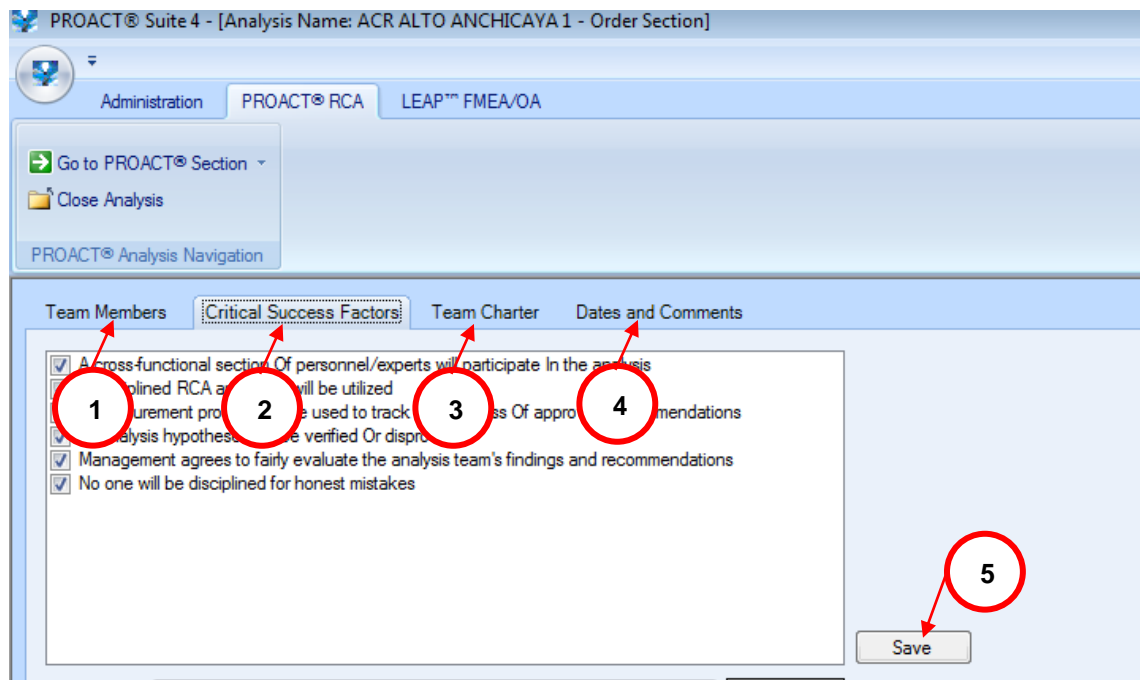
Apply Filter Clear Filter

Current Login: Danny Ranmirez

La siguiente Sección es la de Orden en esta se puede verificar y modificar algunas de las definiciones que se hicieron al crear el análisis. En la Figura 5-16 se presenta esta pantalla.

1. *Team Members*. Miembros del equipo, en esta pestaña se puede adicionar o eliminar miembros del equipo de trabajo.
2. *Critical Success Factors*. Permite modificar los factores de éxito asignados en el análisis.
3. *Team Charter*. Permite verificar el acta del equipo.
4. *Dates and Comments*. Presenta las fechas establecidas del análisis y agregar comentarios.

Figura 5-16 Pantalla “Go to order section”



La siguiente sección es la de análisis en esta sección desarrollaremos el árbol lógico completo, se encontrarán las causas raíces del evento y se realizarán recomendaciones para solucionarlas.

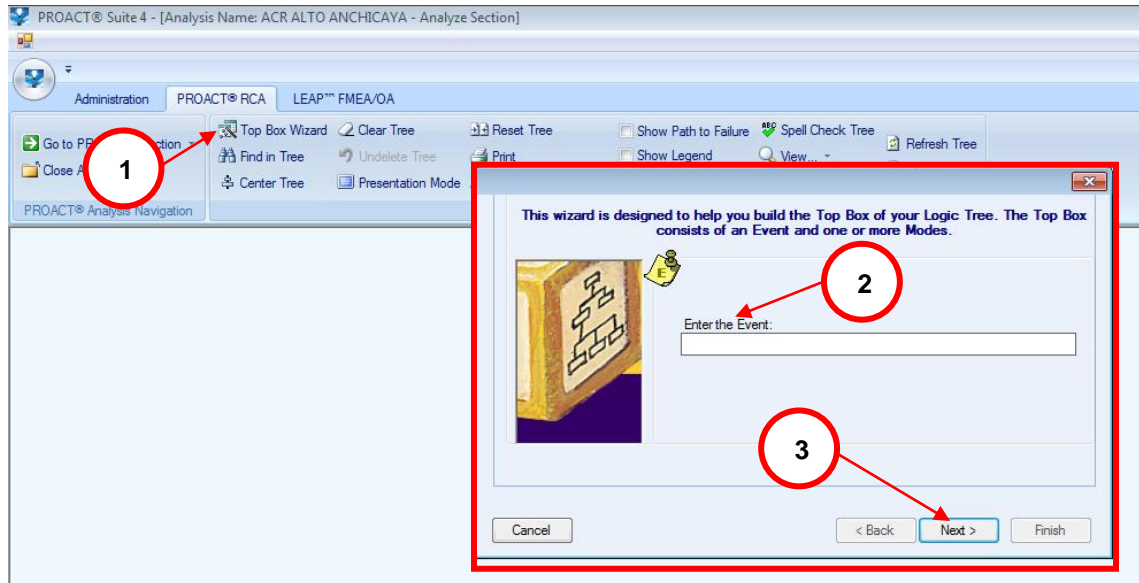
5.2.3 Construcción del Árbol Lógico

La Figura 5-17 muestra la pantalla de la sección de análisis y empezaremos la construcción del árbol lógico. A continuación, se presenta el proceso para construcción del árbol lógico.

1. *Top Box Wizard*. Este es el botón que activa el asistente que permite crear la parte superior del árbol lógico. La parte superior del árbol lógico es el evento y los modos de falla.

2. *Enter the Event.* En este espacio se debe escribir el nombre del evento a analizar.
3. *Next.* Siguiente cuando terminemos de escribir el nombre del evento.

Figura 5-17 Pantalla para ingresar el nombre del evento.



Nombrado el evento aparece la pantalla de la Figura 5-18 que permite ingresar los modos de Falla del evento.

1. Espacio para adicionar cada uno de los modos de Falla
2. *Finish.* Finalizar la construcción de la parte superior del árbol lógico.

Figura 5-18 Pantalla para ingresar los modos de falla.

Enter one or more MODES. Use the TAB key to move down to the next row

Modes

1

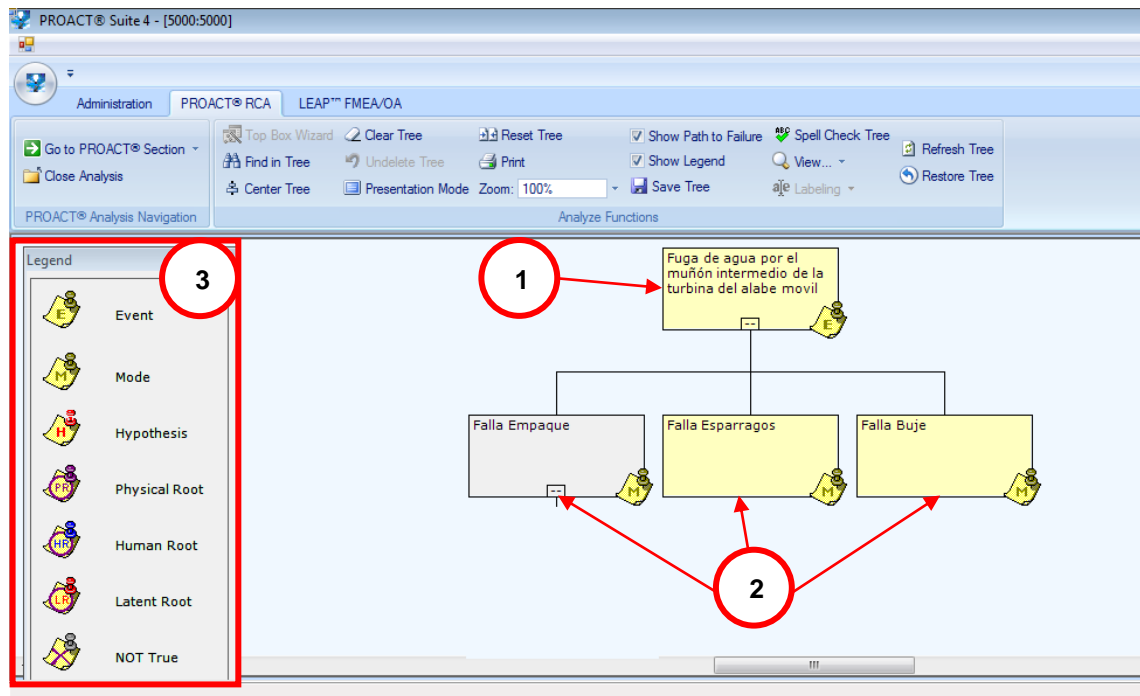
2

Cancel < Back Finish

En la Figura 5-19 se presenta la construcción automática de la parte superior del árbol lógico que hizo el asistente. Aquí podemos identificar.

1. Evento a analizar ubicado en la parte superior del árbol lógico.
2. Modos de falla relacionados en este análisis.
3. Leyenda del árbol lógico con el significado de cada uno de los íconos

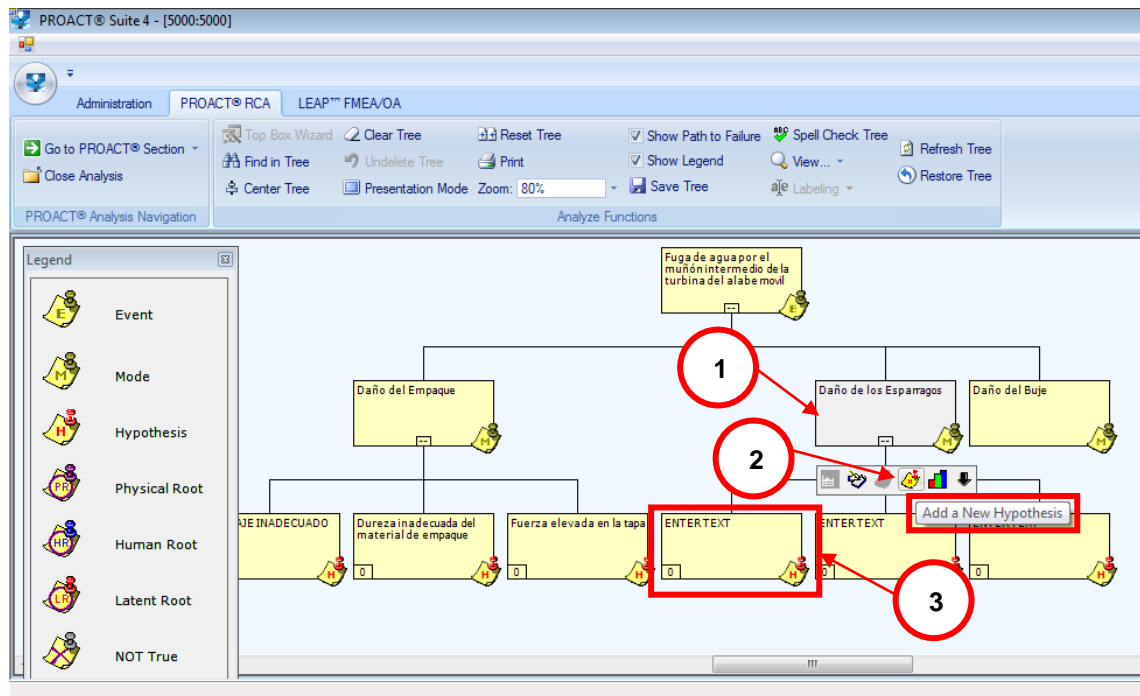
Figura 5-19 Parte superior del árbol lógico



Una vez ingresados los modos de falla el siguiente paso es establecer las hipótesis y verificarlas. Para encontrar las hipótesis el equipo de trabajo debe plantearse la pregunta para cada modo de falla ¿Cómo puede ser? Estas hipótesis fueron encontradas en el análisis del Capítulo 4 de este documento. El proceso para crear las nuevas hipótesis es:

1. Click sobre el modo de falla en el cual vamos a adicionar la nueva hipótesis.
2. Click en ícono *Add New Hypothesis*
3. Cuadro de hipótesis.

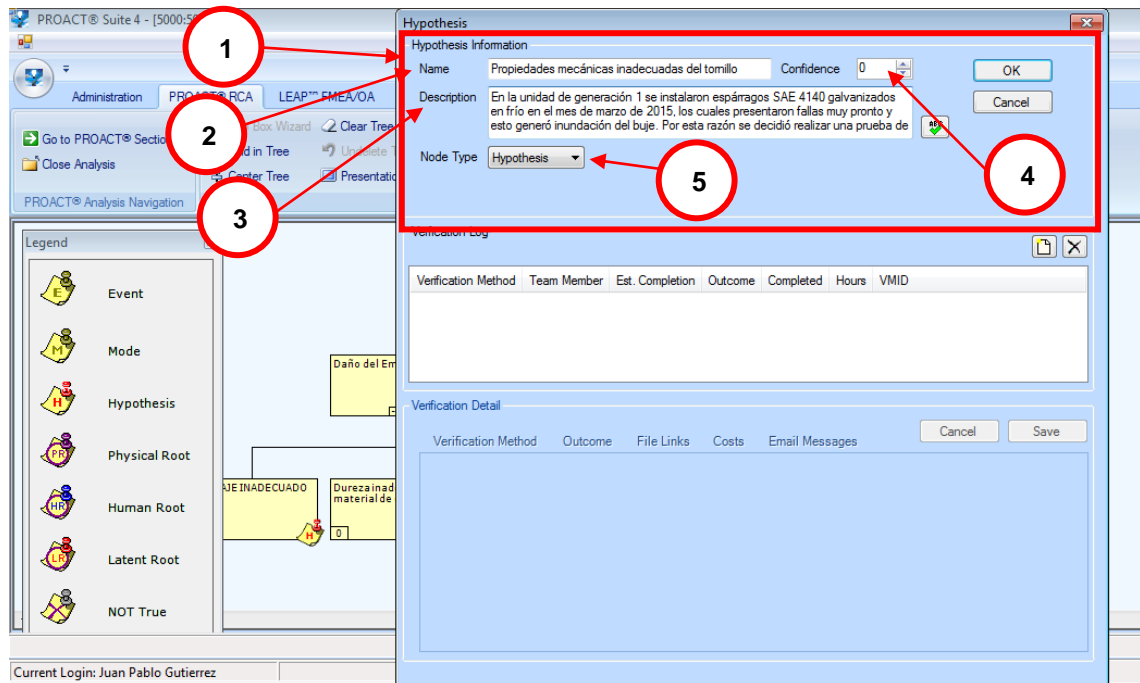
Figura 5-20 Añadir nuevas hipótesis.



Para ingresar la información de la nueva hipótesis se debe dar doble click en el nuevo recuadro de la hipótesis y aparece una ventana emergente como en la Figura 5-21 y se deben llenar los siguientes datos:

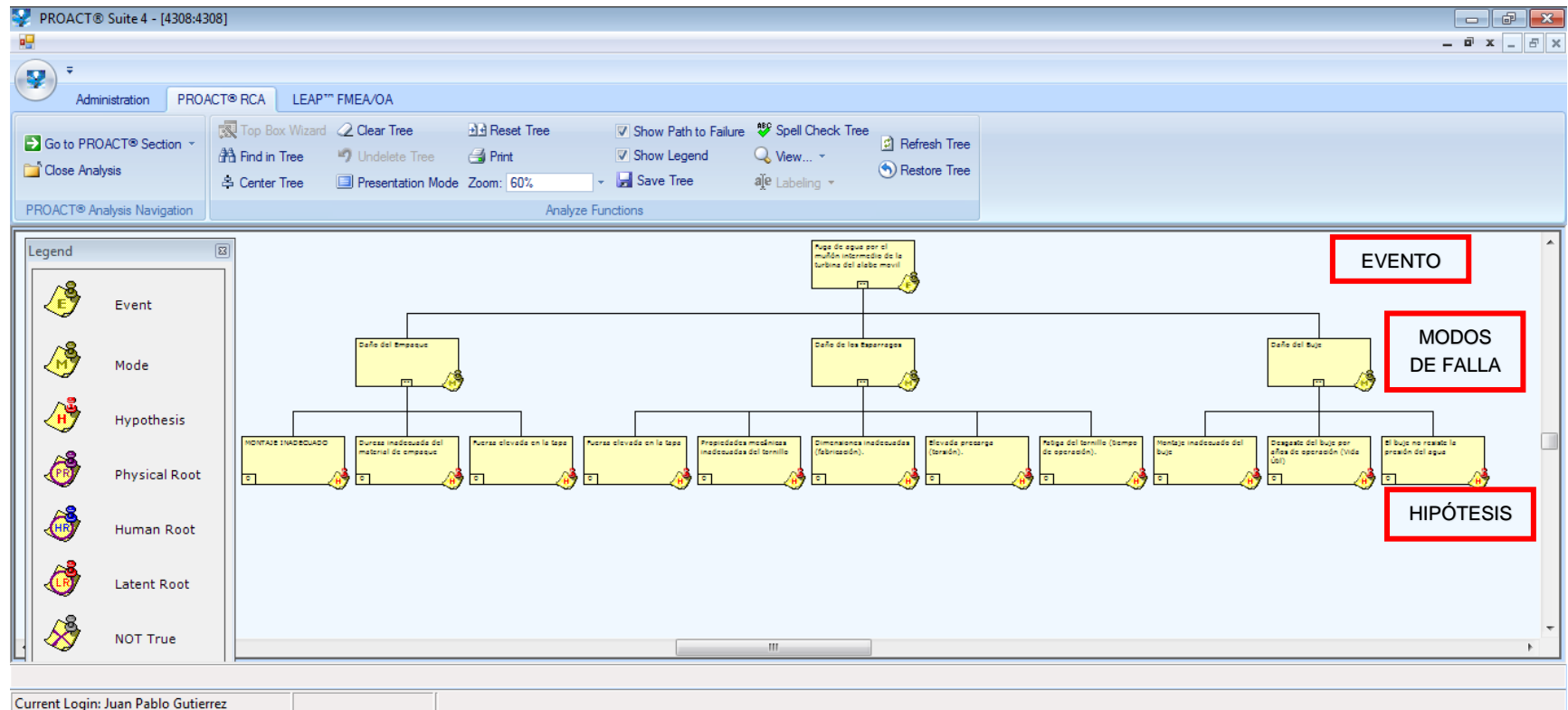
1. *Hypothesis Information*. Espacio para ingresar la información de la hipótesis
2. *Name*. Nombre de la hipótesis.
3. *Description*. Descripción de la hipótesis.
4. *Confidence*. Confianza o seguridad que esta hipótesis es la causa. Para nuestro caso siempre será cero.
5. *Node Type*. Tipo de nodo que es el recuadro. En este caso hipótesis para todos.

Figura 5-21 Cuadro información de cada hipótesis.



Todas las hipótesis deben ser ingresadas a cada uno de los modos de falla de la misma manera para completar el diagrama lógico. En la Figura 5-22 se presenta el árbol lógico una vez terminada esta etapa. Todas las hipótesis ingresadas fueron presentadas en el Capítulo 4 de este documento.

Figura 5-22 Árbol lógico completo con hipótesis.



Después de tener el diagrama lógico con todas las hipótesis planteadas por el equipo de trabajo se procede a la verificación de cada una de ellas con el objetivo de encontrar la causa raíz del problema. Para ingresar esta información en el software se debe presionar doble click sobre la hipótesis a verificar y seguir este procedimiento:

1. Espacio de *Verification Log*.
2. Botón *Add New Verification Log*. Permite ingresar la verificación de la hipótesis en las pestañas inferiores.
3. *Team Member Responsible*. Miembro del equipo responsable de la verificación es una lista desplegable donde se escoge el responsable.
4. *Date Due*. Fecha de la verificación.
5. *Verification Method*. Se debe ingresar el método de verificación. EN nuestro caso hemos utilizado algunos como, conclusiones del equipo, resultados de laboratorio, verificación en terreno y planos y verificación ficha técnica del proveedor y cálculos.
6. *Outcome*. Pestaña para escribir los resultados de la verificación.
7. *File Links*. Permite cargar archivos evidencias de la verificación como imágenes, videos o audios.
8. *Costs*. Permite relacionar los costos de esta verificación.
9. *Email Messages*. Permite pedirle al software que envíe correos automáticamente a los miembros del equipo que informe a todos acerca de la verificación de la hipótesis.
10. *Save*. Guarda los cambios de la verificación asociados a la hipótesis.

Figura 5-23 Pantalla para verificación de hipótesis.

The screenshot shows a software window titled "Hypothesis" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into three main sections:

- Hypothesis Information:** Contains fields for "Name" (MONTAJE INADECUADO), "Confidence" (0), "Description" (El procedimiento para el montaje de los paquetes se explicó en capítulo 3 de este documento y según las revisiones del personal encargado se ejecuta bien. Adicionalmente se están implementando unas mejoras como que el corte de los), "Node Type" (Hypothesis), and buttons for "OK" and "Cancel". A green checkmark icon is also present.
- Verification Log:** A table with columns: Verification Method, Team Member, Est. Completion, Outcome, Completed, Hours, VMID. It is highlighted with a red border and contains a red circle labeled "1". A red circle labeled "10" is next to the "VMID" column header.
- Verification Detail:** Contains tabs for "Verification Method", "Outcome", "File Links", "Costs", and "Email Messages". Below the tabs are fields for "Team Member Responsible" (JUAN DAVID ORTEGON), "Date Due" (martes, 20 de junio de 2017), and a "Review" button. Red circles labeled "3", "4", "5", "6", "7", "8", and "9" point to various elements in this section.

Después de guardar la información de verificación de la hipótesis tendríamos la pantalla de la Figura 5-24. No olvidar cambiar el tipo de nodo de hipótesis a No verdadera, para garantizar que la hipótesis fue descartada pues el software sobrescribe una "X" en estas.

1. Espacio de *Verification Log* con la información de la verificación realizada.
2. *Node Type*. Tipo de nodo que es el recuadro. En este caso NO VERDADERO pues la hipótesis fue descartada

Figura 5-24 Pantalla de hipótesis verificada.

Hypothesis

Hypothesis Information

Name: MONTAJE INADECUADO Confidence: 0

Description: El procedimiento para el montaje de los empaques se explicó en capítulo 3 de este documento y según las revisiones del personal encargado se ejecuta bien. Adicionalmente se están implementando unas mejoras como que el corte de los

Node Type: Not True

Verification Log

Verification Method	Team Member	Est. Completion	Outcome
CONCLUSION DEL EQUIPO	JUAN DAVID ORTEGON	20/06/2017	Pegar los empaques con Loctite 410 y dejar los corte

Verification Detail

Verification Method Outcome File Links Costs Email Messages

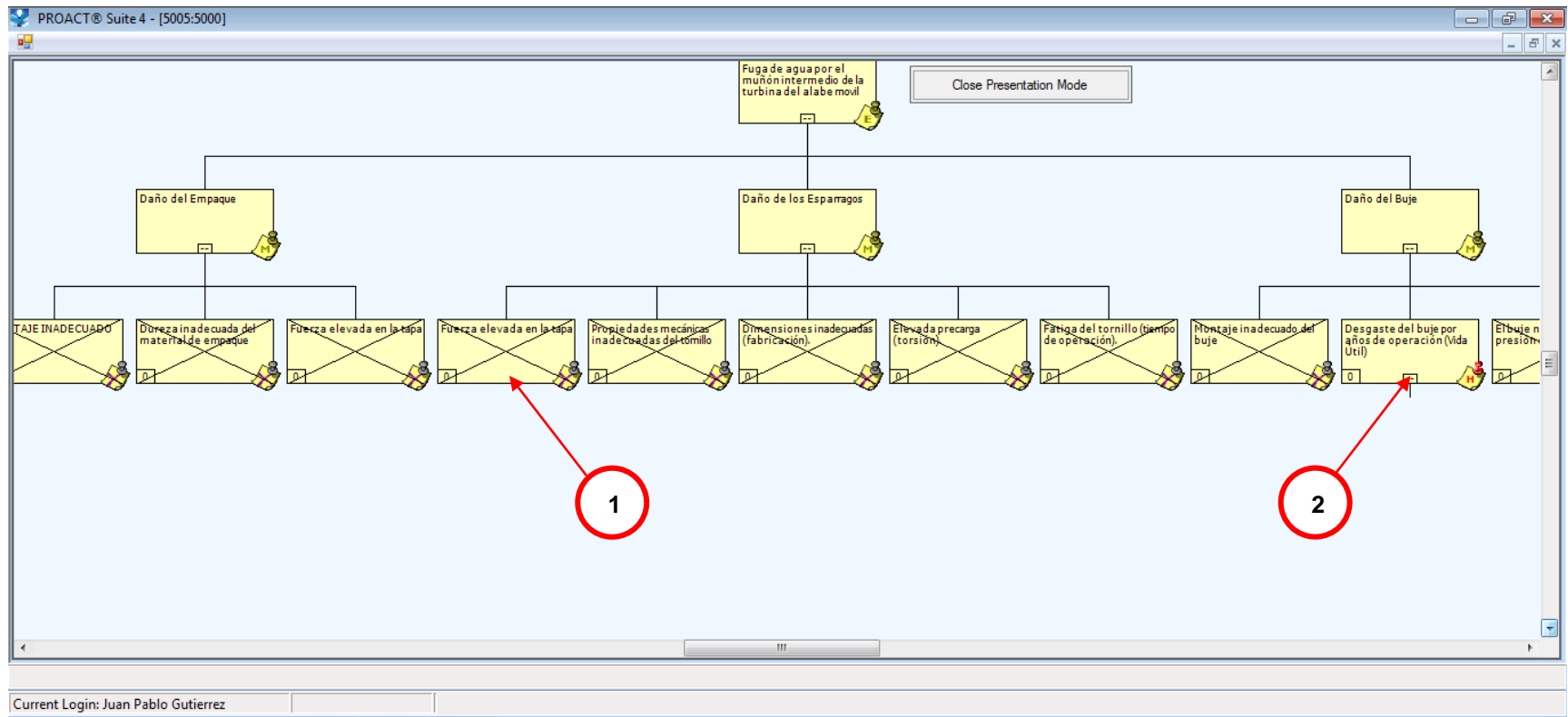
Outcome

Completion Date

Esta verificación se debe hacer con cada una de las hipótesis, toda la información de verificación de las hipótesis se presentó en el Capítulo 4 de este documento. La hipótesis no descartada es definida como la causa raíz del evento. En la Figura 5-25 se presenta el diagrama lógico con las hipótesis descartadas.

1. Hipótesis descarta. Bloque amarillo con una "X" sobrescrita.
2. Hipótesis no verificada. Causa raíz.

Figura 5-25 Árbol lógico con hipótesis verificadas.



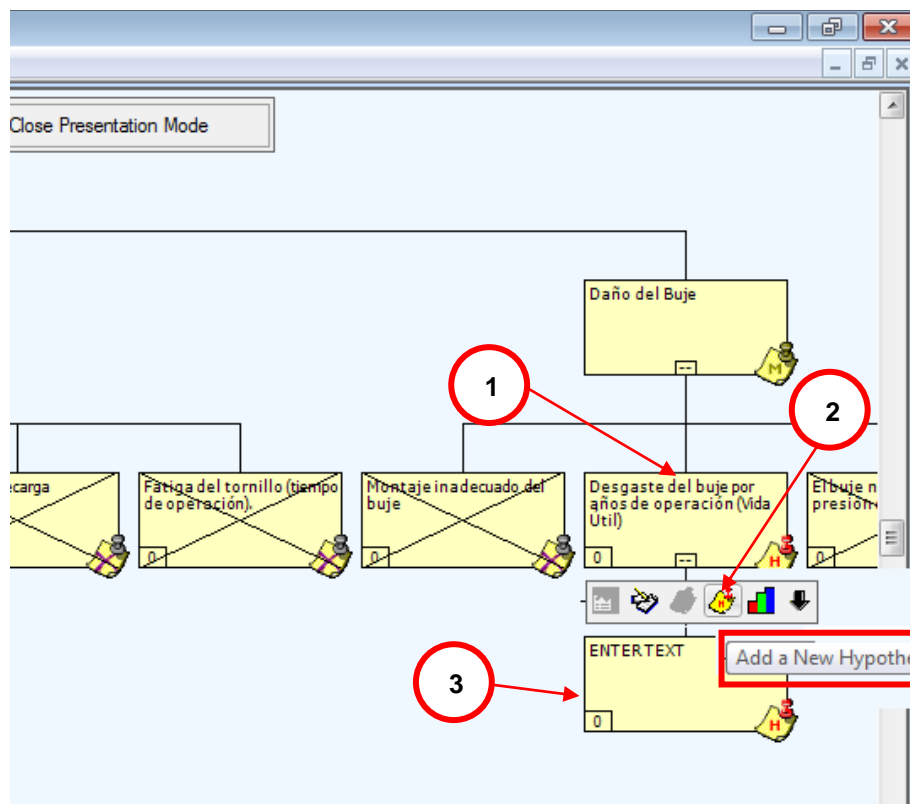
5.2.4 Identificar causas raíces: Físicas, Humanas y Latentes

Una vez terminadas de verificar las hipótesis de falla se procede a identificar las causas raíces del problema de fuga de agua.

Para adicionar la causa raíz tenemos que hacer el procedimiento de la Figura 5-26.

1. Click sobre la hipótesis que no fue descartada y debajo de la cual se desprende la causa raíz.
2. Click en ícono *Add New Hypothesis*
3. Cuadro de hipótesis que creamos para adicionar la causa raíz.

Figura 5-26 Añadir recuadro para crear la Causa Raíz Física



Para ingresar la información acerca de la causa raíz física hacemos doble click sobre la nueva hipótesis y seguimos el procedimiento indicado en la Figura 5-27.

1. *Name*. Nombre de la causa raíz física.
2. *Description*. Descripción de la causa raíz física.
3. *Node Type*. Tipo de nodo que es el recuadro. En este caso *Physical Root*.
4. *Make Recommendation*. Botón para hacer las recomendaciones ante esta causa raíz encontrada

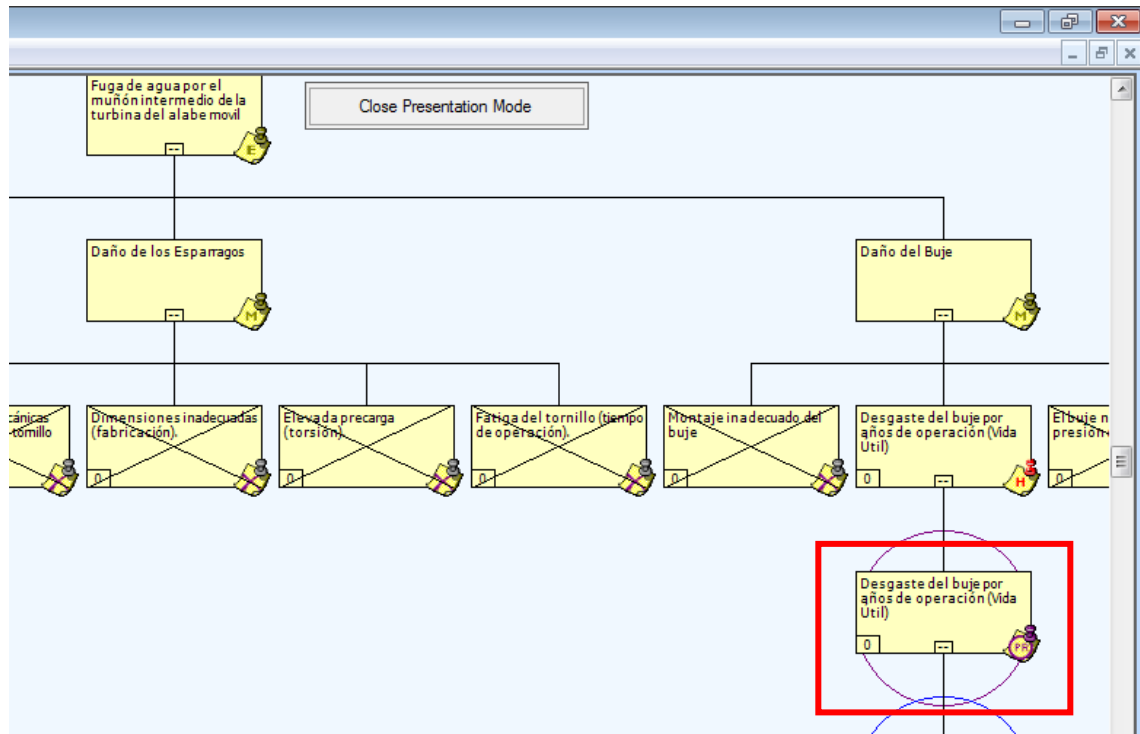
Figura 5-27 Ventana para ingresar información de las causas raíces.

The screenshot shows a software window titled "Hypothesis". It contains several sections and controls:

- Hypothesis Information:** This section is highlighted with a red rectangle. It includes:
 - Name:** A text field containing "Desgaste del buje por años de operación (Vida Útil)".
 - Description:** A text area containing "los bujes están sometidos a la presión que ejerce el agua, la presión de los servomotores y los ciclos de apertura y cierre, condiciones que hacen que este deba ser cambiado con una mayor frecuencia."
 - Node Type:** A dropdown menu set to "Physical Root".
 - Node Category:** A dropdown menu set to "<Not Categorized>".
 - Confidence:** A spinner control with a red circle labeled "1" pointing to it.
 - Make Recommendation:** A button with a red circle labeled "3" pointing to it.
 - OK and Cancel buttons:** Located to the right of the description field.
 - ABC icon:** A small icon with a green checkmark and the letters "ABC", with a red circle labeled "2" pointing to it.
- Verification Log:** A section below the hypothesis information, containing a table with the following headers: "Verification Method", "Member", "Est. Completion", "Outcome", "Completed", "Hours", and "VMID". A red circle labeled "4" points to the "Verification Method" header.
- Verification Detail:** A section at the bottom with tabs for "Verification Method", "Outcome", "File Links", "Costs", and "Email Messages". It also has "Cancel" and "Save" buttons.

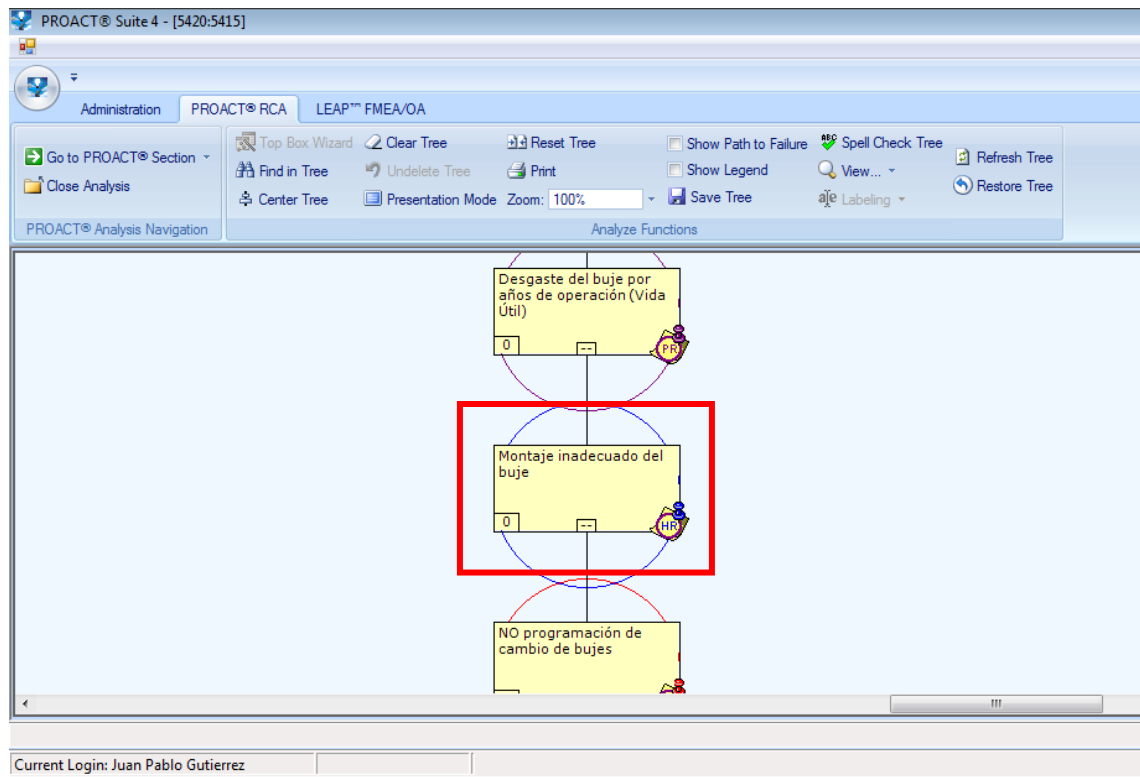
Una vez ingresada la información acerca de la causa raíz física tendríamos un árbol lógico con un nivel adicional y se presenta en la Figura 5-28.

Figura 5-28 Identificación Causa Raíz Física.



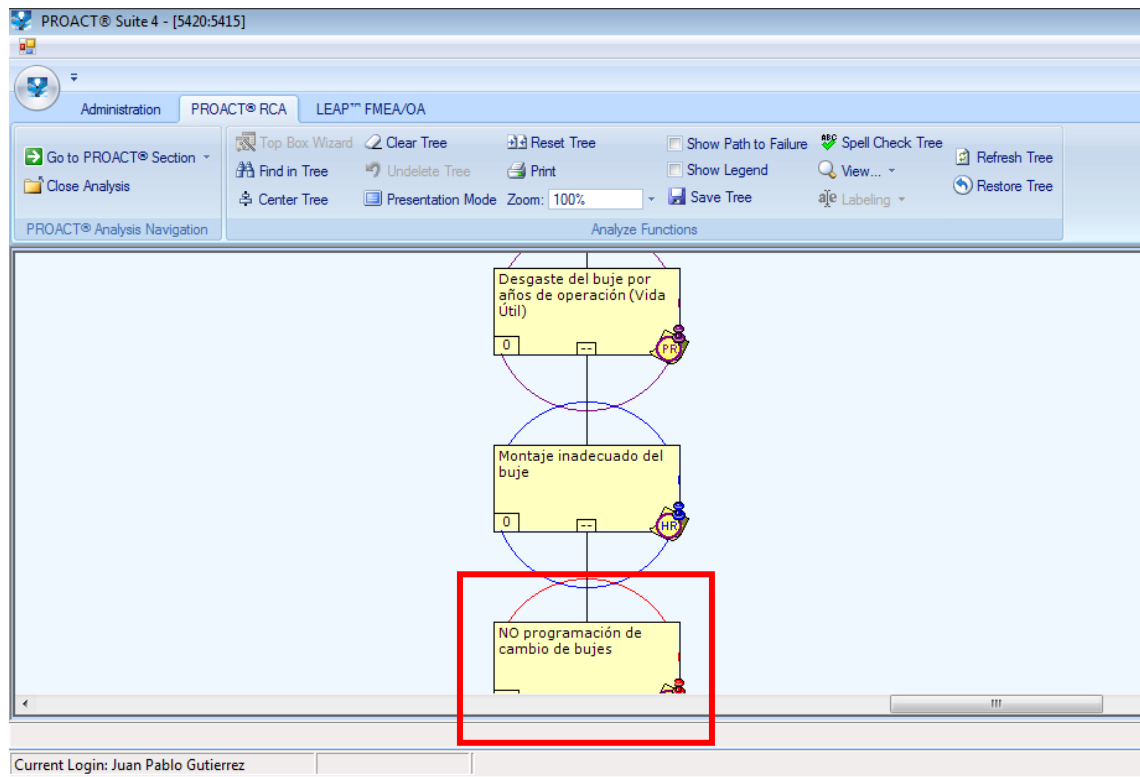
La siguiente causa raíz a identificar es la humana para ingresarla al software hacemos el mismo procedimiento explicado en la causa anterior y tendríamos nuestro árbol lógico como el de la Figura 5-29

Figura 5-29 Identificación Causa Raíz Humana



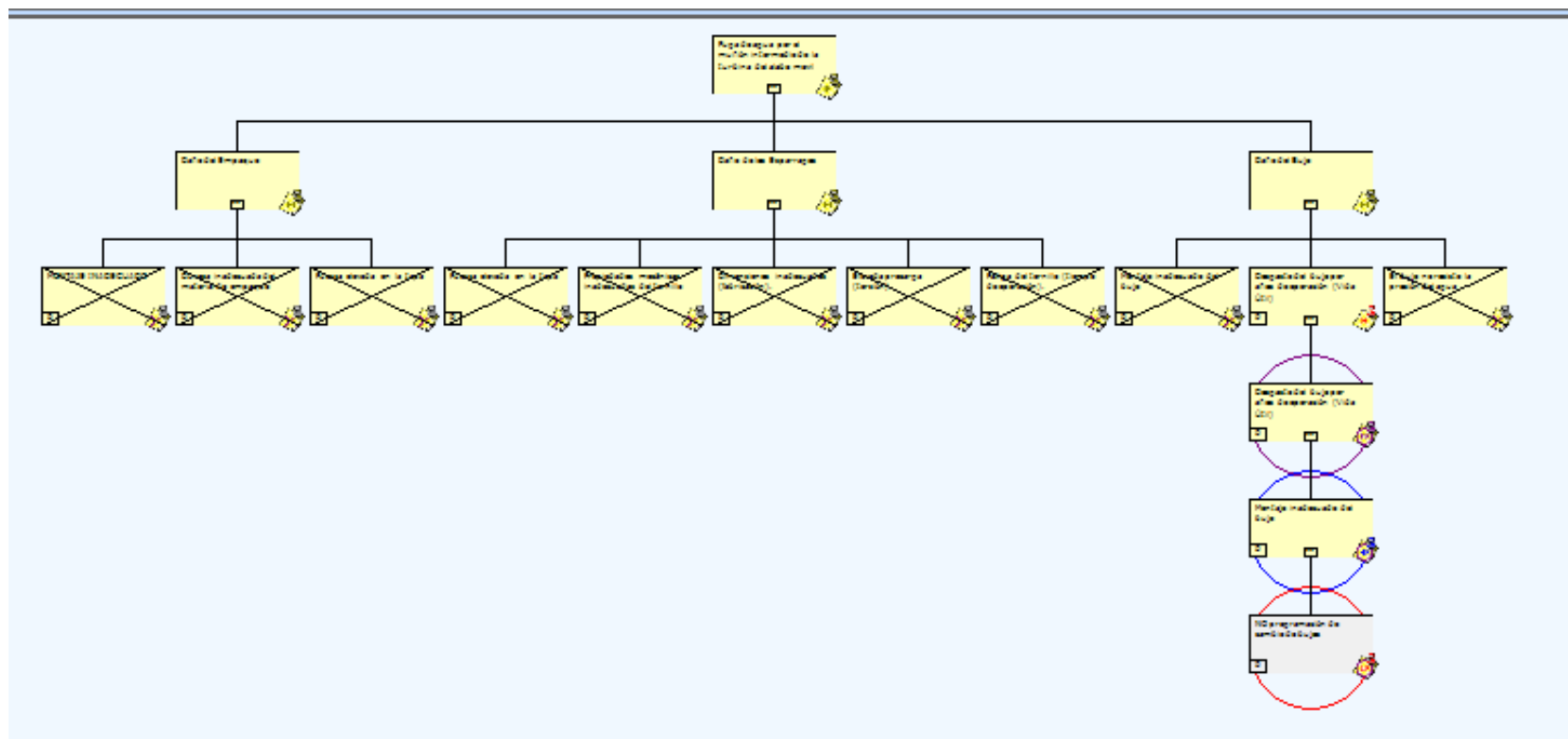
La última causa raíz a identificar es la latente o sistémica para ingresarla al software hacemos el mismo procedimiento explicado en la causa anterior y tendríamos nuestro árbol lógico como el de la Figura 5-30

Figura 5-30 Identificación Causa Raíz Latente



El árbol lógico del análisis finalizado se presenta en la Figura 5-31.

Figura 5-31 Árbol lógico Finalizado. Software ACR



5.2.5 Determinación de medidas correctivas y preventivas

Una vez encontradas las causas raíces del evento analizado es necesario que dentro del software queden propuestas las recomendaciones del equipo de trabajo, cada una de estas propuestas debe estar relacionada con alguna de las causas raíces.

Para insertar estas recomendaciones debemos dar doble click en la causa raíz que vamos a solucionar y presionar el botón “*Make Recommendation*” como en la Figura 5-32

Figura 5-32 Pantalla de Causa Raíz. Botón “*Make Recommendation*”

Hypothesis

Hypothesis Information

Name: Desgaste del buje por años de operación (Vida Útil) Confidence: 0

Description: los bujes están sometidos a la presión que ejerce el agua, la presión de los servomotores y los ciclos de apertura y cierre, condiciones que hacen que este deba ser cambiado con una mayor frecuencia.

Node Type: Physical Root Node Category: <Not Categorized>

Make Recommendation

Verification Log

Verification Method	Team Member	Est. Completion	Outcome	Completed	Hours	VMID
---------------------	-------------	-----------------	---------	-----------	-------	------

Verification Detail

Verification Method Outcome File Links Costs Email Messages

Cancel Save

Para realizar la recomendación sobre la causa raíz se debe llenar la pantalla presentada en la Figura 5-33.

1. *Cause*. Se presenta el nombre de la causa sobre la cual se realizará la recomendación.
2. *Root Type*. Se presenta el tipo causa sobre la cual se realizará la recomendación.
3. *Recommendation Executive Summary*. Resumen directivo de la recomendación para la causa raíz.
4. *Detailed Recommendation*. Espacio para explicar detalladamente a que se refiere con la recomendación.
5. *Process Owner*. Se debe poner un “dueño” del proceso o responsable de la recomendación. Se escoge un miembro del equipo.
6. *Expected Completion Date*. Fecha prevista de finalización.
7. *Recommendation Status*. Estado de la recomendación. Este se actualiza por lo pronto en nuestro caso es una recomendación.
8. *Save*. Guardar la recomendación
9. *Finish*. Si no se tienen más recomendaciones sobre esta causa raíz se procede a finalizar.

Estas recomendaciones las puede hacer cualquier miembro del equipo e inmediatamente se informa al resto de integrantes cual es la propuesta y en consenso se aprueba con fecha de expectativa o se rechaza.

Figura 5-33 Recomendación realizada a la causa raíz latente del proyecto.

The screenshot shows a web-based form titled "Hypothesis". It contains the following elements:

- 1**: Points to the "Cause" dropdown menu, which currently displays "NO programación de cambio de bujes".
- 2**: Points to the "Root Type" text input field, which contains "Latent Root".
- 3**: Points to the "Recommendation Executive Summary" text area, containing the text "Definir política de cambio de bujes".
- 4**: Points to the "Detailed Recommendation" text area, containing the text "Se debe definir desde las directivas una política clara para el cambio de los bujes. hacer una evaluación financiera de los costos por parada para cambio de bujes vs daños por posible inundación e indisponibilidad de la unidad."
- 5**: Points to the "Process Owner" dropdown menu, which displays "JUAN DAVID ORTEGON".
- 6**: Points to the "Expected Completion Date" dropdown menu, which displays "23/06/2017".
- 7**: Points to the "Recommendation Status" section, which contains a list of checkboxes: "Proposed" (checked), "Rejected", "Approved", "In-Progress", and "Completed".
- 8**: Points to the "Save" button in the bottom navigation bar.
- 9**: Points to the "Finished" button in the bottom right corner.

Other visible elements include an "Add" button, an "Edit" button, a "Cancel" button, a "Delete" button, a "Go Back to Verifications" button, and a "Record 1 of 1" indicator.

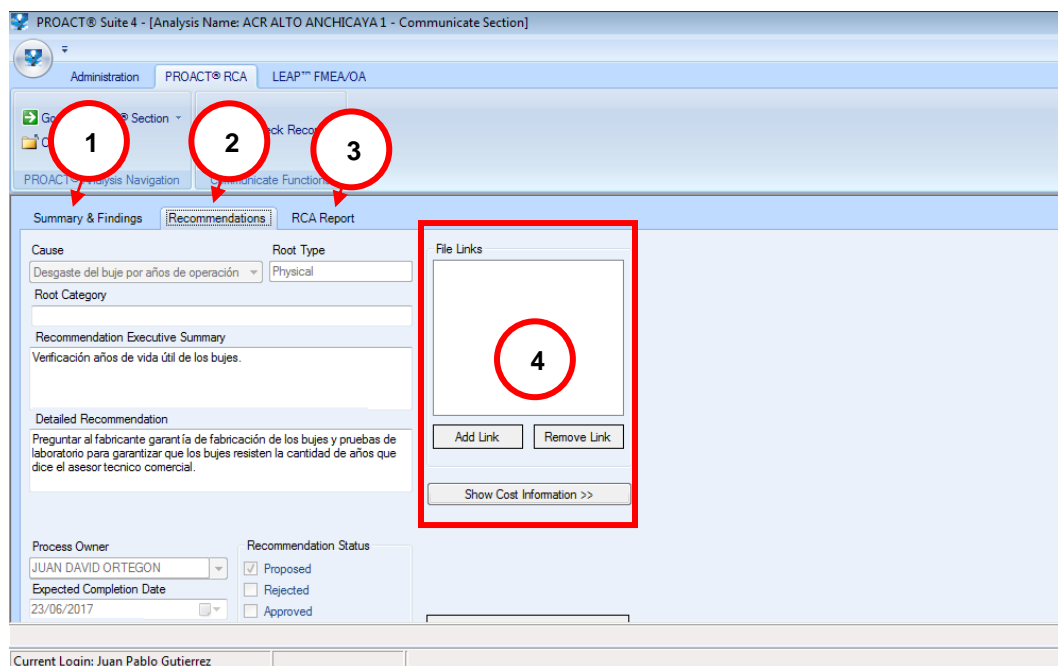
Se debe realizar al menos una recomendación por cada una de las causas raíces encontradas y pueden ser varias para una sola causa.

Con estas recomendaciones se termina la sección de análisis de la pestaña PROACT RCA.

La siguiente sección se llama de comunicación y permite hacer seguimiento a todas las recomendaciones realizadas por el equipo de trabajo. En esta sección se deben presentar las evidencias de la ejecución de las recomendaciones aprobadas. EN la Figura 5-34 se presenta la sección de comunicación y sus 3 pestañas.

1. *Summary & Findings*. Pestaña de resumen y conclusiones.
2. *Recommendations*. Pestaña para seguimiento de recomendaciones
3. *RCA Report*. Esta pestaña es para imprimir reportes automáticos
4. *File Lnks*. Espacio para presentar evidencias del cumplimiento de las recomendaciones.

Figura 5-34 Pantalla para seguimiento de recomendaciones



La Figura 5-35 presenta la ventana para la impresión de reportes y encontramos lo siguiente:

1. *Acknowledgements*. Agradecimientos que va a ir impresos en el reporte.
2. *Header*. Encabezado del reporte.
3. *Footer*. Píe de página del reporte.
4. *Quick Report*. Permite mostrar un reporte rápido.
5. *Print RCA Report*. Imprimir reporte RCA permite tener el reporte completo del caso de análisis.

Figura 5-35 Pantalla para imprimir reportes

PROACT® Suite 4 - [Analysis Name: ACR ALTO ANCHICAYA 1 - Communicate Section]

Administration PROACT® RCA LEAP™ FMEA/OA

Go to PROACT® Section -
Close Analysis

PROACT® Analysis Navigation

Summary & Findings Recommendations **RCA Report**

Acknowledgements

	Company	Title	Contributor	Expertise
▶	UNIVALLE	INGENIERO	JUAN ORTEGON	ACR
*				

Save

Communicate Report Custom Headers and Footers. Right-click to insert, or type

Headers

Footers

www.reliability.com of m

Estimated ROI Quick Report **Print RCA Report**

Current Login: Juan Pablo Gutierrez

Después de presionar el Botón 5 de la Figura 5-35 *Print RCA Report* se deben seleccionar los temas a imprimir en la ventana emergente de Figura 5-36 para obtener el reporte automático.

1. ¿Qué contenido quiere incluir en el reporte?
2. Espacio donde está el contenido disponible y sede seleccionar lo que se va a imprimir en el reporte automático.
3. Espacio que muestra los temas seleccionados que se imprimirán en el reporte.
4. *Next*. Botón para continuar.

Figura 5-36 Selección de Temas para la impresión del reporte automático.

Communicate Report - Topic Selection

What content do you want to include in the report?

Available Topics

- ☐ Preserve (5P's)
 - ☐ Data Collection
 - ☐ Preserve File Links
- ☐ Order
 - ☐ Team Members
 - ☐ Charter
 - ☐ Critical Success Factors
 - ☐ Dates and Comments
- ☐ Analyze
 - ☐ Logic Tree (8.5" x 11", 1 Page Only)
 - ☐ Verification Logs
 - ☐ Verification File Links
- ☐ Communicate
 - ☐ Event and Cause Summaries
 - ☐ Executive Summary Recommendations
 - ☐ Detailed Recommendations
 - ☐ Root Cause Descriptions
 - ☐ Acknowledgements
 - ☐ Recommendation File Links
- ☐ Analysis-At-A-Glance
 - ☐ Listing of Preserve Costs
 - ☐ Listing of Verification Costs
 - ☐ Listing of Recommendation Costs
 - ☐ Analysis Summaries - ROI
 - ☐ Process Flow Charts
 - ☐ Root Cause Action Matrix
 - ☐ Estimated ROI Per Recommendation

Selected Topics

☐ Use Default Topics ☐ Use Saved Settings

Después de seleccionar los Temas para la impresión del reporte se deben seleccionar algunos aspectos de la impresión como portada y nombres a imprimir. En la Figura 5-37 se presenta este paso.

1. *Use Cover Page*. Utilizar Portada.
2. Título del Reporte.
3. Espacio donde se deben diligenciar los datos de la Portada tales como: Título, subtítulo, compañía, Teléfono y dirección.
4. *Principal Analyst*. Incluir el nombre del analista principal.
5. *Analysis Name*. Incluir el nombre del análisis.
6. *Print Date*. Incluir fecha de impresión.
7. *Use Logo*. Cargar una imagen como logo de la portada.
8. *Show Team Member Names*. Incluir el nombre de los miembros del equipo de Trabajo.

Figura 5-37 Selección de los elementos de la Portada del reporte automático.

The screenshot shows a software window titled 'Use Cover Page' with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into two main sections. The top section contains a form for cover page details, and the bottom section contains 'Report Options'. Eight red circles with numbers 1 through 8 are overlaid on the window, with arrows pointing to specific elements.

Top Section:

- 1:** Points to the 'Use Cover Page' checkbox, which is checked.
- 2:** Points to the 'Title' text box, which contains 'ACR ALTO ANCHICAYA Report'.
- 3:** Points to the 'Save Topics and Cover Page Settings' button.
- 4:** Points to the 'Principal Analyst' checkbox, which is checked.
- 5:** Points to the 'Analysis Name' checkbox, which is checked.
- 6:** Points to the 'Print Date' checkbox, which is checked.
- 7:** Points to the 'Use Logo' checkbox, which is unchecked.
- 8:** Points to the 'Show Team Member Names' checkbox in the 'Report Options' section, which is checked.

Form Fields (Top Section):

- Title: ACR ALTO ANCHICAYA Report
- Subtitle: (empty)
- Company Name: (empty)
- Address: (empty)
- City/State/Zip: (empty)
- Phone: (empty)

Report Options (Bottom Section):

- ☐ Include Divider Pages in Report
- ☒ Show Team Member Names
- ☒ Use disclaimer on report cover page
- Edit Disclaimer button

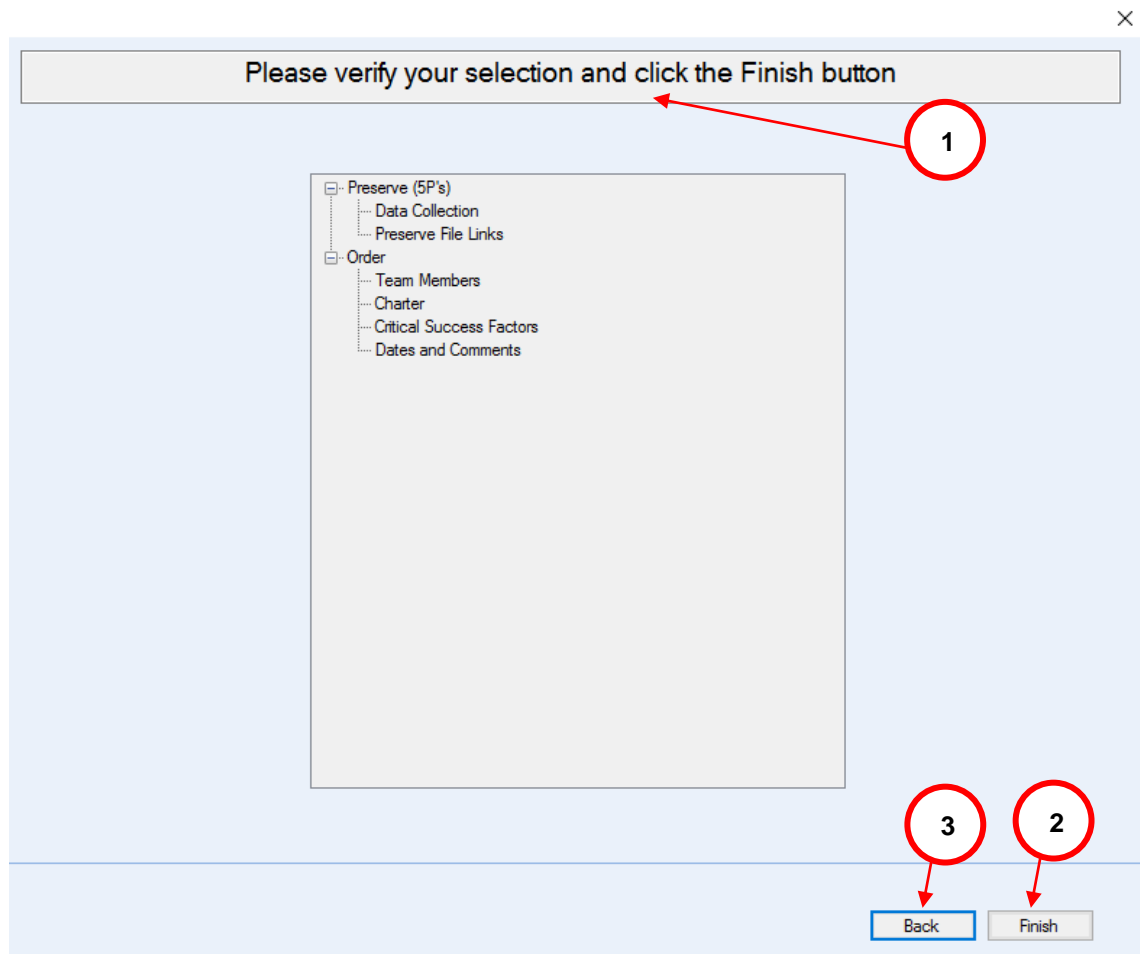
Navigation Buttons:

- Back button
- Next button

En la ultima ventana antes de obtener el reporte automático se deben verificar los datos anteriormente seleccionados. Esta ventana es como la de la Figura 5-38.

1. Ventana de verificación de la selección de los temas para la impresión del reporte automático.
2. *Finish*. Finaliza la verificación y procede a la impresión del reporte automático.
3. *Back*. Atrás para corregir lo antes seleccionado.

Figura 5-38 Ventana de verificación de la selección para impresión del reporte automático.



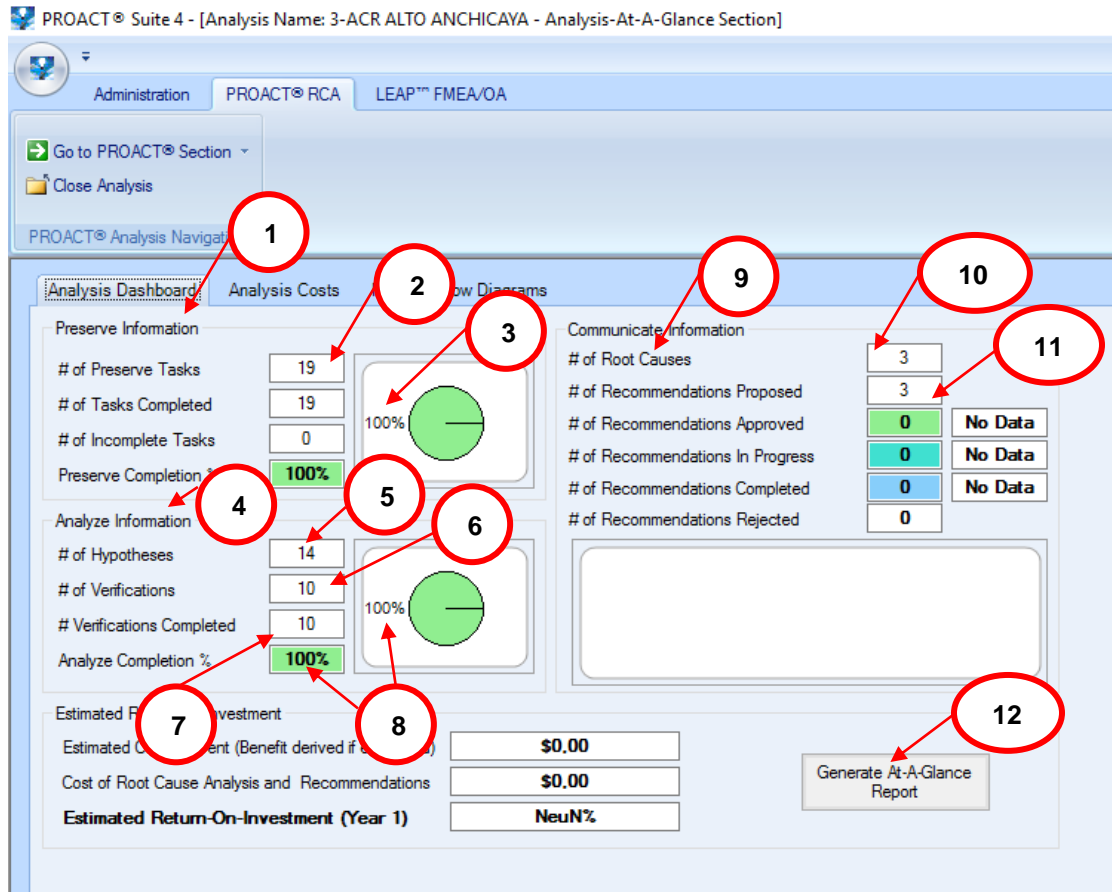
El reporte automático del programa se entrega en un documento en Word y se presenta en el Anexo 2 de este documento.

La última sección es la de ojeada del análisis en la cual se presenta un resumen del caso de análisis realizado. Figura 5-34.

1. *Preserve Information*. Sección de recolección de información.
2. *# of Preserve Tasks*. Cantidad de datos recolectados
3. *Preserve Completion %*. Porcentaje de información recopilada completado.
4. *Analyze information*. Información del análisis.
5. *# of Hypotheses*. Número de hipótesis.
6. *# of Verifications*. Número de verificaciones.
7. *# Verification completed*. Número de verificaciones completadas.
8. *Analyze completion %*. Porcentaje de análisis completado.
9. *Communicate Information*. Información de comunicación

10. # of Root Causes. Número de causas raíces del análisis.
11. # of Recommendation Proposed. Número de recomendaciones propuestas.
12. Generate At-A Glance Report. Impresión de un reporte del vistazo rápido del análisis.

Figura 5-39 Sección de resumen Software ACR



Este sería el Final del análisis realizado el software PROACT SUITE 4

CONCLUSIONES

- La metodología ACR resulta ser muy acertada para el análisis de sistemas complejos, bajo este parámetro EPSA ha definido los criterios específicos para seleccionar los casos de falla a los cuales es necesario aplicar la metodología dada la complejidad y multiplicidad de sistemas interconectados que conforman cada una de sus centrales de generación. Resulta muy importante tener claros estos criterios ya que la aplicación de la metodología a casos en los que no resulte verdaderamente necesario hacer este tipo de análisis, se traduce directamente a pérdidas en tiempo de trabajo del personal y uso innecesario de herramientas y recursos económicos.
- Según el análisis de las metodologías que realizan Análisis de la Causa Raíz, es posible concluir que la metodología más acertada para el análisis de fallas en sistemas tan complejos como son las centrales de generación de EPSA es la metodología PROACT. Destacan entre sus cualidades la estructura detallada de los pasos a seguir en el análisis, la organización y automatización de la información y la eficacia para conseguir resultados contundentes.
- Es fundamental tener presente que el éxito del análisis propuesto en este trabajo está necesariamente precedido por la comprensión holística de los sistemas que se encuentran en estudio y de la multiplicidad de los factores implicados. Es ésta la razón fundamental para conformar el equipo de análisis interdisciplinariamente, de manera que los puntos de vista distintos logren abarcar la totalidad de las posibles causas para un evento.
- Actualmente las empresas soportan sus análisis con herramientas de sistemas, este tipo de softwares resultan muy útiles sobre todo en la organización y estandarización de los procesos y en el almacenamiento de la información. Siendo el ACR un método de análisis tan complejo que analiza causas tanto humanas como físicas y latentes, el uso del software *PROACT SUITE V 4* resulta ser muy acertado en una compañía tan grande como EPSA. La correcta utilización del software permitirá a la empresa soportar análisis muy detallados de sistemas de alta complejidad con una estricta organización de la información y de realización de procesos. Este software permite también realizar recomendaciones a problemas asociados a las causas raíces vinculadas a cada evento y realiza por medio de recordatorios un seguimiento y/o verificación de los procedimientos por realizar.
- El caso analizado es La Fuga de agua por el muñón intermedio de los alabes móviles, una falla que es muy frecuente en la central Alto Anchicayá. Para este caso se encontraron las 3 causas raíces del problema las cuales son:

Desgaste del buje por los años de operación como la causa raíz física, el montaje inadecuado del buje como la causa raíz humana y la NO programación para el cambio de los bujes como la causa raíz latente o sistémica. Estas tres causas raíces se obtuvieron de la aplicación de la metodología de análisis causa raíz Proact explicada y desarrollada en este documento.

- En este documento se propone una recomendación para cada una de las causas raíces encontradas, para el desgaste del buje por los años de operación se propone revisar los cálculos de presión que deben soportar los bujes para garantizar que los que se están comprando cumplan con esa especificación, para el montaje inadecuado del buje se propone mejorar las condiciones del espacio reducido donde se debe hacer el montaje como iluminación y climatización y para la NO programación del Cambio de bujes se propone a la gerencia realizar un análisis económico para definir política de cambio de bujes en todas las unidades de generación.


REFERENCIAS

- [1] R. L. Hughes, *Senior Consultan, Reliability Center Inc*, "The Problem whit Problem Solving". *Plant Engineering Magazine*, Enero 2013.
- [2] "Guía de los fundamentos de mantenimiento y confiabilidad", http://www.aciem.org/home/images/CDN/CGMC_ACIEM/Guia_Fundamento s.pdf.
- [3] S. Ziedelis and M. Noel, "*Comparative Analysis of Nuclear Event Investigation Methods, Tools and Techniques*". JRC Scientific and Technical Reports, 2011.
- [4] L. Contreras, D. Lucietto, J. Santos, and O. Aguillón, "Análisis Causa Raiz De Un Sistema De Generación De Vapor", Artículo, 2010.
- [5] D. L. Gano, "*Seven Steps To Effective Problem-Solving And Strategies For Perosnal Success*". 2011.
- [6] M. Paradies and L. Unger, "*Using the TapRooT System for Process Safety Incident Investigation and Root Cause Analysis,*" Copyright. 2000 by Syst. Improv. Inc., Knoxville, Tennessee., 2000.
- [7] J. F. Lederer, "Air Safety Through Investigation," Junio, 2004.
- [8] J. C. Doshi and B. Trivedi, "*Decision support system using DMAIC for academic scheduling: ICT in education support activities*", 2013 IEEE 5th Int. Conf. Technol. Educ.
- [9] L. Amendola y A. Lárez, "RCA ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ COMO NEGOCIO", Ediciones *PMM Institute for Learning*, Valencia - España, 2015.
- [10] W. C. Yoon. D.S. Kim, D.H. Baek, "*Developing a Computer-Aided System for Analyzing Human Error in Railway Operations*", Korea Adv. Inst. Sci. Technol. Daejeon, Korea; Hanyang Univ. Ansan.
- [11] D. R. J., "Root Cause Investigation Best Practices Guide," *Acquisition Risk and Reliability Engineering Department. AEROSPACE*. 2014.
- [12] J. Ocampo and A. Pavón, "Integrando la Metodología DMAIC de Seis Sigma con la Simulacion de Eventos Discretos en Flexsim," *LACCEI Lat. Am. Caribb. Conf. Eng. Technol.*, pp. 1–10, 2012.
- [13] R. O. Florez, *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. 2005.
- [14] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Caracterizacion de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generacion de energia," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.

- [15] Urbano Sánchez Domínguez, *Máquinas Hidráulicas*. 2012.
- [16] H. Alvarez. “Misión: Cero Averías, Técnicas y estrategias para eliminar averías en equipos industriales”. Instituto Colombiano de Mantenimiento Productivo Total. 1998.
- [17] Guía de aprendizaje, Análisis Proactivo de Fallas. Curso de Capacitación en gestión del mantenimiento.

ANEXO 1 FORMATOS DE LA METODOLOGÍA

Anexo 1a para la Identificación del evento o tipo de falla a analizar

 EPSA <small>una empresa CELSA</small>	REPORTE DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-01-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 2
--	--	---

1. Datos Iniciales

Fecha del Reporte	
Fecha y Hora de la Falla	
Central Hidroeléctrica	
Sistema en Falla	
Elemento en Falla	
Operadores de Turno	
Técnicos de Turno	-
Ingeniero de Turno	-

Descripción del evento
¿Qué sucedió?
¿Cómo se evidenció la falla? (Chisporroteo, Olor a quemado o Sonidos Extraños)
¿Se encuentra algún elemento físicamente Averiado?
¿Tiene Fotografías?



REPORTE DE FALLAS Y
 EVENTOS CENTRALES
 HIDROELÉCTRICAS

F-01-ACR-GEN
 V 1.0
 Hoja 2 de 2


2. Caracterización del Evento

Criterios de caracterización del evento	SI	NO	N.A.
¿El Evento origina desviaciones de generación? (Productos No Conformes)			
¿El Evento origina daños a la salud (accidente o enfermedad laboral) o impactos ambientales?			
¿El Evento origina indisponibilidad mayor a 2 días en una unidad de generación?			
¿El Evento ocurre con una frecuencia superior o igual a 2 veces al mes?			
¿Alguien Recomendo que este evento debía Analizarse? (Criterio de un experto - feeling)			
¿Se le desconoce la causa de la falla (ghost) al Evento?			
¿Es primera vez que Ocurre el Evento en la Central?			
¿En el Evento está involucrada la fiabilidad humana?			
¿El Evento es de Baja Frecuencia o Alto Impacto?			
¿Es necesario aplicar la metodología ACR?			

Firma

Ingeniero Jefe de Planta

Anexo 1b para la definición del equipo de análisis para cada caso de evento

	CONFORMACIÓN EQUIPOS DE ANALISIS DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-02-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1
---	---	--

1. Datos del evento

Fecha del Reporte	
Fecha y Hora de la Falla	
Central Hidroeléctrica	
Sistema en Falla	
Elemento en Falla	
Jefe de Planta	

2. Conformación de equipos de análisis de eventos

Facilitador del proceso (Experto ACR):

Facilitador: Es la persona capacitada en la metodología ACR, debe guiar al grupo en el análisis del evento y por lo tanto debe tener claridad en los conceptos de la metodología.

Lider del proceso:

--

Personal de operación especializado (operadores, ingenieros eléctricos, mecánicos, etc.)

Personal de mantenimiento especializado (técnicos eléctricos, mecánicos, instrumentistas)

Personal de planeación. (Proyectos de la Compañía)

--


¿Se requiere Personal externo especializado ?

--

Firma

Ingeniero Jefe de Planta

Anexo 1c para la recolección de información.

	RECOPILAR INFORMACIÓN DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-03-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 2
1. Datos del evento (Posición)		
Fecha del Reporte		
Fecha y Hora de la Falla		
Central Hidroeléctrica		
Sistema en Falla		
Elemento en Falla		
2. Personal Relacionado con la falla		
Operadores de Turno		
Antes de la falla		
Durante la Falla		
Despues de la Falla		
Mantenimiento Eléctrico		
Mantenimiento Mecánico		
Ingeniero de Turno		
Personal que evidenció la Falla		
NOTA:		



RECOPILAR INFORMACIÓN
DE FALLAS Y EVENTOS
CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS

F-03-ACR-GEN

V 1.0

Hoja 2 de 2

3. Información para el análisis (Papel)

Descripción	SI	NO	N.A.
Diagramas de flujo o flujograma del sistema fallado			
Planos eléctricos, mecánicos, civiles.			
Manuales del fabricante de los equipos que integran el sistema fallado.			
Manuales de operación normal del sistema fallado.			
Registros históricos de las variables asociadas al sistema, antes, durante y después de la falla.			
Condiciones de operación antes de la falla.			
Bitácora (papel y medio magnético).			
Planes de mantenimiento.			
Ordenes de trabajos			
Informes técnicos de fallas similares			
Informe del levantamiento de la falla actual			
Evidencias físicas de la falla			
Listado de rarezas encontradas en el sitio de la falla			

4. Paradigmas

¿Se encontró alguna rareza en el proceso? (Malos Procesos o Mal uso de los Equipos)

Firma (Líder del Proceso ACR)

Cargo

Anexo 1d para la construcción del diagrama de ambiente del sistema fallado.


 EPSA <small>Empresa Pública de Salto de Agua</small>	DIAGRAMA DE AMBIENTE DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-04-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1
---	---	---

1. Diagrama de ambiente.

El diagrama de ambiente permite identificar los elementos que interactúan con el sistema Analizado de manera general. Adicionalmente entre estos se unen con flechas que indican el camino de la información (Entradas y/o Salidas). Es un diagrama de Contextualización del sistema.

Nombre (Lider Proceso ACR)
Cargo

Anexo 1f para la construcción del diagrama funcional.

	DIAGRAMA FUNCIONAL DE FALLAS Y EVENTOS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	F-06-ACR-GEN V 1.0 Hoja 1 de 1
1. Diagrama Funcional.		
El diagrama funcional es una representación gráfica del sistema analizado, se identifican señales de entrada, procesamiento de señales y salidas. Permite identificar que hace cada señal y como afecta al sistema general.		
Nombre (Lider Proceso ACR)		
Cargo		

ANEXO 2 IMPRESIÓN DEL REPORTE AUTOMÁTICO.